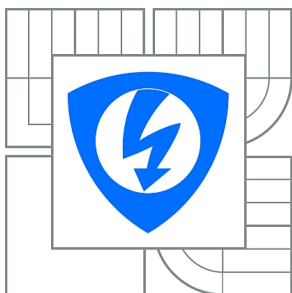




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SOUČASNÝ OBOUSMĚRNÝ PŘENOS DAT A NAPÁJECÍHO SIGNÁLU JEDNÍM OPTICKÝM VLÁKNEM

SIMULTANEOUS BIDIRECTIONAL TRANSFER OF DATA AND POWER SUPPLY OVER ONE
FIBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ BAURA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Tomáš Baura

ID: 98407

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) V návaznosti na semestrální projekt podrobněji rozeberte a popište možnosti využití optického vlákna pro současný přenos světelné energie pro napájení a datové informace.
- 2) Navrhněte možná řešení oddělení napájení a datového signálu (TDM/WDM). Jako převodník světelná/elektrická energie uvažujte fotodiodu. Výstupní napěťový signál využitelný pro napájení elektrických obvodů musí mít minimální velikost 0,3 V. Rozeberte možné způsoby a maximální dosažitelné rychlosti přenosu datové informace v jednosměrném a obousměrném režimu po jednom optickém vlákně.
- 3) Navrhněte obousměrný optický přenosový kanál s konkrétními komponentami pro TDM přenos a pro technologii WDM.
- 4) Experimentálně ověřte parametry zvolených optických slučovačů a rozbočovačů pro TDM přenos a komponent systému WDM. Ověřte možnost použití laserové diody s integrovanou monitorovací diodou pro příjem datového signálu.
- 5) Realizujte jednoduchý obousměrný komunikační datový a napájecí kanál s TDM přenosem po jednom optickém vlákně a druhý kanál s komponentami WDM a ověřte jejich dosažitelné parametry (útlum datového a napájecího kanálu, dosažitelný elektrický výkon, rychlost přenosu). Vhodná konkrétní řešení pro WDM i TDM vyberte s ohledem na cenu jednotlivých komponent a dle pokynů vedoucího práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Böttger, G. et al. An Optically Powered Video Camera Link. IEEE Photonics Technology Letters. 2008, vol. 20, no. 1, p. 39-41. Published by IEEE. ISSN 1041 1135.
- [2] Kravka, M. Experimental verification of wavelength division multiplexer parameters. In Radioelektronika 2006 - Conference Proceedings. Bratislava: Slovak University of Technology, 2006, p. 121-124. ISBN 80-227-2388-6.
- [3] Liu, Y. et al. Optically Powered Optical Interconnection System. IEEE Photonics Technology Letters. 1989, vol. 1, no. 1, p. 21-23. Published by IEEE. ISSN 1041 1135.
- [4] Pena, R. et al. Fiber-based 205-mW (27% efficiency) power-delivery system for an all-fiber network with optoelectronic sensor units. Applied Optics. 1999, vol. 38, no. 12, p. 2463-2466. Published by Optical Society of America. ISSN 0003-6935.
- [5] Werthen, J. G. et al. Current Measurements Using Optical Power. In Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference. 1996, p. 213-218. Published by IEEE, Los Angeles, USA.

ISBN: 0-7803-3522-8.

Další dle vlastního literárního průzkumu a na základě doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu a realizaci přenosových systémů, které využívají jedno optické vlákno pro současný obousměrný přenos optického napájecího a datového signálu. Jedná se o systémy polarizačního (PDM), vlnového (WDM) a časového (TDM) multiplexu.

V teoretické části této práce jsou blíže popsány a specifikovány optická vlákna, zdroje a detektory optického záření a pasivní optické komponenty vhodné pro realizaci zadaných přenosových systémů. Dále jsou popsány principy jednotlivých přenosových systémů, včetně výběru konkrétních optických a optoelektronických součástek pro sestavení přenosových systémů TDM a WDM.

V praktické části této práce jsou v každé kapitole popsány metody a postupy použité pro jednotlivá měření. Nejdříve jsou měření ověřovány a charakterizovány parametry jednotlivých optoelektronických a optických komponentů přenosových systémů. A následně měřeny parametry už sestavených přenosových systémů TDM a WDM jako např. útlum kanálů, účinnost přeneseného elektrického výkonu, rychlost přenosu a další. Na závěr je zkoušena a ověřována možnost detekce vnějšího optického signálu na integrované fotodiodě PIN laserové diody, což by mohlo být použito jak pro vysílání, tak i příjem datového signálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vlnový multiplex, časový multiplex, polarizační multiplex, laserová dioda, fotodioda PIN, optické vlákno, optická spojka / rozbočka, optický multiplexer / demultiplexer, optický útlum, optický výkon, spektrální charakteristika.

ABSTRACT

This Bachelor's Thesis deals with projecting and implementation of transmission systems using a single optical fibre for parallel bidirectional transmission of optical power and data signal. These systems include Polarization Division Multiplexing (PMD), Wave Division Multiplexing (WDM) and Time Division Multiplexing (TDM).

The theoretical part of the thesis closely describes and specifies optical fibre, optical radiation sources and detectors as well as passive optical components suitable for transmission system implementation. Further, the thesis describes principles of individual transmission systems including a selection of particular optical and optoelectronic parts for the TDM and WDM transmission composition.

Each chapter of the practical part of this document describes methods and processes used for individual measurements. First the individual parameters of individual optoelectronic and optical components of transmission systems are verified and characterized. This is followed by measuring the parameters of the composed TDM and WDM transmission systems such as optical loss, transmitted electric power efficiency, transfer speed etc. Finally, the possibility of outer optical signal detection on an integrated photodiode PIN of the laser diode is tested and verified, which could be used for both transmission and reception of data signal.

KEYWORDS

Wave Division Multiplexing (WDM), Time Division Multiplexing (TDM), Polarization Division Multiplexing (PDM), Laser Diode, Photodiode PIN, Optical Fibre, optical coupler/splitter, Wavelength Multiplexer/Demultiplexer, optical loss, optical power, spectral characteristic.

Bibliografická citace

BAURA, T. *Současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 88 s, 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „*Současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: 28. května 2010

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 28. května 2010

.....
podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD.....	14
2. OPTICKÁ VLÁKNA.....	15
2.1 POPIS OPTICKÉHO VLÁKNA	15
2.2 HLAVNÍ PARAMETRY OPTICKÝCH VLÁKEN.....	17
2.3 VÝHODY OPTICKÝCH VLÁKEN	17
3. ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ.....	18
3.1 POŽADAVKY NA ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	18
3.2 LUMINISCENČNÍ DIODY	18
3.3 LASEROVÉ DIODY	19
3.3.1 Přehled jednotlivých typů laserových diod.....	20
3.3.2 Fabry -Perotův rezonátor.....	20
3.3.3 Hlavní parametry laserových diod.....	21
4. DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ.....	23
4.1 POŽADAVKY NA DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	23
4.2 FOTODIODA PIN.....	23
4.2.1 Hlavní parametry fotodiod	25
5. TECHNIKA TDM PŘENOSŮ SIGNÁLŮ.....	26
5.1 OPTICKÉ SLUČOVAČE / ROZBOČOVAČE	27
5.1.1 Hlavní parametry optických slučovačů / rozbočovačů.....	27
6. TECHNIKA WDM PŘENOSŮ SIGNÁLŮ	28
6.1 OPTICKÉ MULTIPLEXERY / DEMULTIPLEXERY	29
6.1.1 Optické MUX / DMUX realizované jako soustava dielektrických filtrů.....	29
6.1.2 Optické MUX / DMUX realizované vlnovody uspořádanými do mřížky.....	29
6.1.3 Optické MUX / DMUX realizované vláknovou Braggovou mřížkou.....	30
6.1.4 Hlavní parametry optických multiplexerů / demultiplexerů	30
7. TECHNIKA PDM PŘENOSŮ SIGNÁLŮ.....	31
8. NÁVRH PŘENOSOVÝCH SYSTÉMŮ.....	32
8.1 NÁVRH PŘENOSOVÉHO SYSTÉMU TDM.....	32
8.2 NÁVRH OPTICKÉHO PŘENOSOVÉHO SYSTÉMU WDM	33

8.3	VÝBĚR KOMPONENTŮ PRO SYSTÉM WDM A TDM	34
9.	POPIS KOMPONENTŮ PRO TDM A WDM.....	35
9.1	ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ.....	35
9.1.1	<i>Katalogové hodnoty zvolených laserových a LED diod</i>	<i>36</i>
9.2	DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	39
9.2.1	<i>Katalogové hodnoty zvolených fotodiod PIN.....</i>	<i>39</i>
9.3	OPTICKÝ SLUČOVAČE / ROZBOČOVAČE PRO TDM	40
9.4	OPTICKÝ MULTIPLEXERY / DEMULTIPLEXERY PRO WDM	41
10.	MĚŘENÍ PARAMETRŮ LASEROVÝCH DIOD A FOTODIOD SYSTÉMŮ	
	TDM A WDM.....	43
10.1	POSTUP MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI VÝSTUPNÍHO OPTICKÉHO VÝKONU NA PRACOVNÍM PROUDU LASEROVÝCH DIOD.....	43
10.2	MĚŘENÍ NA LASEROVÉ DIODĚ SIEMENS SPL 2F81	44
10.2.1	<i>Stanovení prahového, pracovního proudu a účinnosti laserové diody</i>	<i>45</i>
10.2.2	<i>Zhodnocení měření.....</i>	<i>46</i>
10.3	MĚŘENÍ NA LASEROVÉ DIODĚ PL13B002ST83-S-0.....	47
10.3.1	<i>Zhodnocení měření.....</i>	<i>48</i>
10.4	POSTUP MĚŘENÍ CITLIVOSTI FOTODIOD	48
10.5	MĚŘENÍ NA FOTODIODĚ TESLA 3 WN 166 20.....	49
10.5.1	<i>Stanovení hodnot parametru citlivosti fotodiod.....</i>	<i>51</i>
10.5.2	<i>Zhodnocení měření.....</i>	<i>51</i>
10.6	MĚŘENÍ NA FOTODIODĚ PDINP075ST83-W-0	51
10.6.1	<i>Stanovení hodnot parametru citlivosti fotodiody.....</i>	<i>53</i>
10.6.2	<i>Zhodnocení měření.....</i>	<i>53</i>
11.	MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH SLUČOVAČŮ/ROZBOČOVAČŮ A	
	MUX/DMUX.....	54
11.1	METODA VLOŽENÝCH ZTRÁT	54
11.2	MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH SLUČOVAČŮ / ROZBOČOVAČŮ THORLABS FCMM625-90A-FC	55
11.2.1	<i>Zhodnocení měření.....</i>	<i>57</i>
11.3	MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH MUX / DMUX LASER COMPONENTS MX.062.0813.32-1	58
11.3.1	<i>Zhodnocení měření.....</i>	<i>60</i>
12.	MĚŘENÍ NA SYSTÉMECH TDM A WDM.....	61
12.1	MĚŘENÍ ÚTLUMU NAPÁJECÍHO A DATOVÉHO KANÁLU.....	61

12.1.1	Měření útlumu napájecího a datového kanálu systému TDM	61
12.1.2	Měření útlumu napájecího a datového kanálu systému WDM	62
12.1.3	Zhodnocení měření.....	63
12.2	PROMĚŘOVÁNÍ NAPÁJECÍHO A DATOVÉHO KANÁLU SYSTÉMU TDM A WDM	64
12.2.1	Měření napájecího a datového kanálu systému TDM.....	65
12.2.2	Měření napájecího a datového kanálu systému WDM.....	67
12.3	VÝPOČET PŘENESENÉHO ELEKTRICKÉHO VÝKONU NAPÁJECÍHO KANÁLU SYSTÉMU TDM A WDM	69
12.3.1	Zhodnocení vypočtených hodnot.....	71
12.4	MĚŘENÍ RYCHLOSTI PŘENOSU SYSTÉMŮ TDM A WDM	72
12.4.1	Postup měření rychlosti přenosu systému TDM A WDM.....	72
12.4.2	Měření rychlosti napájecího kanálu WDM.....	72
12.4.3	Měření rychlosti datového kanálu WDM	74
12.4.4	Zhodnocení měření.....	74
13.	MĚŘENÍ NA LD S INTEGROVANOU FD PIN.....	75
13.1	POSTUP PŘEPOČTU SVĚTELNÉHO TOKU NA ZÁŘIVÝ TOK	75
13.1.1	Charakteristika a popis veličin pro přepočet $\Phi(\lambda)$ na $\Phi_e(\lambda)$	76
13.1.2	Výpočet světelného toku Φ použitých LED diod.....	77
13.1.3	Výpočet zářivého toku Φ_e použitých LED diod.....	78
13.2	POSTUP MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ DOPADAJÍCÍHO NA INTEGROVANOU FOTODIODU LASEROVÉ DIODY	78
13.2.1	Laserová dioda U-LD-650543A při dopadajícím světelném záření	78
13.2.2	Postup měření.....	79
13.3	MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ NA FOTODIODĚ.....	81
13.3.1	Zhodnocení měření.....	81
13.4	MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY FOTODIODY	82
13.4.1	Zjištění hodnoty pracovního proudu pomocí výpočtu	82
13.4.2	Zjištění hodnoty pracovního proudu pomocí spektrometru.....	83
13.4.3	Změřené spektrální charakteristiky integrované fotodiody	84
13.4.4	Zhodnocení měření.....	84
14.	ZÁVĚR	85
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	86
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	88
	SEZNAM PŘÍLOH.....	88

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1: Struktura optického vlákna	15
Obrázek 2.2: Útlumová charakteristika optických vláken	16
Obrázek 3.1: PN přechod LED diody bez napětí a s přiloženým napětím	19
Obrázek 3.2: Porovnání spekter luminiscenční a laserové diody	21
Obrázek 4.1: Struktura fotodiody	24
Obrázek 4.2: Struktury fotodiod PIN	24
Obrázek 4.3: V - A charakteristika fotodiody a fotodiody PIN	25
Obrázek 5.1: Zjednodušené obecné blokové schéma jednosměrného TDM	26
Obrázek 5.2: Zjednodušené obecné blokové schéma obousměrného TDM	26
Obrázek 6.1: Zjednodušené obecné blokové schéma jednosměrného WDM	28
Obrázek 6.2: Zjednodušené obecné blokové schéma obousměrného WDM	28
Obrázek 7.1: Jednosměrný dvoukanálový přenosový systém PDM	31
Obrázek 8.1: Obousměrný dvoukanálový přenosový systém TDM	32
Obrázek 8.2: Obousměrný dvoukanálový přenosový systém WDM	33
Obrázek 9.1: Řez pouzdrem laserové diody U-LD-650543A	36
Obrázek 9.2: Laserová dioda SIEMENS SPL 2F81	37
Obrázek 9.3: Laserová dioda LASER COMPONENTS PL13B002ST83-S-0	38
Obrázek 9.4: Fotodioda TESLA 3 WN 166 20	39
Obrázek 9.5: Fotodioda LASER COMPONENTS PDINP075ST83-Z-0	40
Obrázek 9.6: Optický slučovač / rozbočovač FCMM625-90A-FC	41
Obrázek 9.7: Optický MUX / DMUX MX.062.0813.32-1	42
Obrázek 9.8: Útlumová - spektrální charakteristika MX.062.0813.32-1 [21]	42
Obrázek 10.1: Schéma měření optického výkonu LD SIEMENS SPL 2F81	44
Obrázek 10.2: Závislost $P_O = f(I_P)$ laserové diody SIEMENS SPL 2F81	45
Obrázek 10.3: Schéma měření optického výkonu LD PL13B002ST83-S-0	47
Obrázek 10.4: Závislost $P_O = f(I_P)$ laserové diody PL13B002ST83-S-0	47
Obrázek 10.5: Schéma měření na rezistoru R_2 fotodiody TESLA 3WN16620	50
Obrázek 10.6: Závislost $I_{R2} = f(P_{O(10dB)})$ pro FD4 TESLA 3 WN 166 20	50

Obrázek 10.7: Schéma měření na rezistoru R_2 fotodiody PDINP075ST83-W-0.....	52
Obrázek 10.8: Závislost $I_{R2} = f(P_o)$ pro FD PDINP075ST83-W-0.....	52
Obrázek 11.1: Popis pouzdra a vývodů FCMM625-90A-FC	55
Obrázek 11.2: Schéma měření vstupního optického výkonu P_{O1} slučovače / rozbočovače.....	55
Obrázek 11.3: Schéma měření výstupního optického výkonu P_{O2} slučovače / rozbočovače.....	56
Obrázek 11.4: Popis pouzdra a vývodů MX.062.0813.32-1	58
Obrázek 11.5: Schéma měření vstupního opt. výkonu P_{O1} MUX / DMUX	58
Obrázek 11.6: Schéma měření výstupního opt. výkonu P_{O2} MUX / DMUX	58
Obrázek 11.7: Spektrální charakteristika fotodiody PDINP075ST83-Z-0	60
Obrázek 12.1: Schéma měření útlumu kanálů systému TDM.....	62
Obrázek 12.2: Schéma měření útlumu kanálů systému WDM	63
Obrázek 12.3: Schéma měření systému TDM pro krok měření 1, 2 a 3.....	65
Obrázek 12.4: Závislost $I_{R2}, I_{R4} = f(I_{P1})$ pro třetí krok měření TDM.....	66
Obrázek 12.5: Schéma měření systému WDM pro krok měření 1, 2 a 3	67
Obrázek 12.6: Závislost $I_{R2}, I_{R4} = f(I_{P1})$ pro třetí krok měření WDM	68
Obrázek 12.7: Závislost $P_2 = f(P_1)$ pro napájecí kanál systému TDM.....	70
Obrázek 12.8: Závislost $P_2 = f(P_1)$ pro napájecí kanál systému WDM.....	70
Obrázek 12.9: Schéma měření rychlosti přenosu napájecího kanálu WDM.....	73
Obrázek 12.10: Změřené tvary budícího (CH1) a přeneseného (CH2) signálu	73
Obrázek 12.11: Schéma měření rychlosti přenosu datového kanálu WDM	74
Obrázek 12.12: Změřené tvary budícího (CH1) a přeneseného (CH2) signálu	74
Obrázek 13.1: Funkce světelné účinnosti záření na lidský zrak dle CIE 1931	76
Obrázek 13.2: Struktura laserové diody U-LD-650543A	79
Obrázek 13.3: Schéma zapojení měření na integrované fotodiodě	80
Obrázek 13.4: Závislosti $I_{R2} = f(\lambda)$ pro různé nastavené LED diody	81
Obrázek 13.5: Spektrální charakteristika integ. fotodiody při $\Phi_e = 0,5$ mW	84
Obrázek 13.6: Spektrální charakteristika integ. fotodiody Int = 60 000 dílků.....	84

SEZNAM TABULEK

Tabulka 8.1: Seznam komponentů zakoupených pro realizaci TDM a WDM	34
Tabulka 9.1: Laserová dioda s integrovanou fotodiodou PIN.....	36
Tabulka 9.2: LED diody pro měření spektrální charakteristiky fotodiody	37
Tabulka 9.3: Laserová dioda pro napájecí kanál TDM a WDM	37
Tabulka 9.4: Laserová dioda pro datový kanál TDM a WDM	38
Tabulka 9.5: Fotodioda pro napájecí kanál systému TDM a WDM.....	39
Tabulka 9.6: Fotodioda pro datový kanál systému TDM a WDM.....	40
Tabulka 9.7: Optické slučovače / rozbočovače pro navrhovaný systém TDM.....	41
Tabulka 9.8: Optické MUX / DMUX pro navrhovaný systém WDM	41
Tabulka 10.2: Porovnání zjištěných hodnot parametrů s katalogovými hodnotami výrobce laserové diody SIEMENS SPL 2F81	46
Tabulka 10.3: Porovnání zjištěných hodnot parametrů s katalogovými hodnotami výrobce laserové diody PL13B002ST83-S-0	48
Tabulka 10.4: Porovnání zjištěných hodnot parametru citlivostí s katalogovými hodnotami výrobce fotodiod TESLA 3 WN 166 20.....	51
Tabulka 10.5: Porovnání zjištěné hodnoty parametru citlivosti s katalogovými hodnotami výrobce fotodiody PDINP075ST83-W-0	53
Tabulka 11.1: Porovnání naměřených hodnot útlumu jednotlivých tras optického slučovače / rozbočovače (2752990) s hodnotami výrobce.....	56
Tabulka 11.2: Porovnání naměřených hodnot útlumu jednotlivých tras optického slučovače / rozbočovače (2752918) s hodnotami výrobce.....	57
Tabulka 11.3: Porovnání naměřených hodnot útlumu jednotlivých kanálů optických MUX / DMUX (S/N: 358) s hodnotami výrobce.....	59
Tabulka 11.4: Porovnání naměřených hodnot útlumu jednotlivých kanálů optických MUX / DMUX (S/N: 359) s hodnotami výrobce.....	59
Tabulka 12.1: Naměřena hodnota optického útlumu přenosového vlákna TDM	61
Tabulka 12.2: Naměřené hodnoty optického útlumu jednotlivých kanálů a přeslechů přenosového systému TDM	62
Tabulka 12.3: Naměřena hodnota optického útlumu přenosového vlákna WDM	63
Tabulka 12.4: Naměřené hodnoty optického útlumu jednotlivých kanálů přenosového systému WDM	63
Tabulka 12.5: Naměřená hodnota optického útlumu přírodních optických vláken datového kanálu TDM a napájecího kanálu WDM.....	69
Tabulka 12.6: Odečtené hodnoty ze závislostí na obrázku 12.7 a 12.8.....	71
Tabulka 13.1: Vypočtené hodnoty světelného toku (Φ) LED diod	77
Tabulka 13.2: Vypočtené hodnoty zářivého toku (Φ_e) LED diod	78

1. ÚVOD

V průběhu posledních několika desetiletí došlo k intenzivnímu rozvoji přenosových sítí užívajících jako přenosového média optické vlákno a nic nenaznačuje tomu, že by tento trend měl skončit.

Tato práce se zaměřuje na teoretický rozbor, návrh a realizaci přenosových systému pro současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem, včetně jejich využití. Jedná se o přenosové systémy TDM (Time - Division Multiplex), WDM (Wavelength - Division Multiplex) a pouze teoreticky popsany systém PDM (Polarization - Division Multiplex). Práce se dále zaměřuje na vhodnou volbu jednotlivých komponent výše uvedených přenosových systémů, včetně ověření jejich parametrů a experimentální ověření detekce optického signálu pomocí libovolné laserové diody s integrovanou fotodiodou PIN, což by mohlo být použito jak pro vysílání, tak příjem datového signálu pomocí jedné komponenty.

V této práci nebylo účelem řešit řídicí elektroniku realizovaných přenosových systémů, zaměřovala se pouze na sestavení těchto přenosových systémů a ověření jejich funkčnosti.

Přenosové systémy TDM a WDM řešené v této práci jsou složeny ze dvou zdrojů a dvou detektorů optického záření. Přičemž systém TDM časově využívá oběma zdroji optického záření jedno optické vlákno, což je realizováno pomocí optických slučovačů / rozbočovačů. A systém WDM umožňuje najednou multiplexovat signály obou zdrojů optického záření pracujících na různých vlnových délkách do jednoho optického vlákna, což je realizováno pomocí optických multiplexerů / demultiplexerů. Podmínka zadání těchto přenosových systémů je, aby výstupní napěťový signál napájecího kanálu měl minimální velikost 0,3 V a jako detektor optického záření byla použita fotodioda.

Pro jednotlivá měření, návrh a realizaci těchto přenosových systémů byla nutná návaznost na teorii optických vláken a výše uvedených komponent, které jsou popsány v počátečních kapitolách této práce.

2. OPTICKÁ VLÁKNA

2.1 POPIS OPTICKÉHO VLÁKNA

Optické vlákno je válcový dielektrický vlnovod zhotovený z nízkoztrátového materiálu, nejčastěji z taveného křemenného skla vysoké chemické čistoty nebo plastu, ve kterém se šíří světlo z jednoho konce vlákna na druhý s využitím Snellova zákona (zákon totálního odrazu). Světlo prochází vnitřní vrstvou - jádrem. Světelné paprsky se odrážejí od další vrstvy - pláště a jsou tak udržovány ve vnitřní vrstvě. [1]



Obrázek 2.1: Struktura optického vlákna [12]

Z hlediska způsobu přenosu světelných paprsků dělíme optická vlákna na dva základní typy [1]:

- **Jednovidová optická vlákna - SM (Singlemode)**

Může se jím šířit pouze jeden světelný paprsek - mod, vid. Vyrábějí se se skokovou změnou indexu lomu jádra pod označením SI - SM (Step Index Singlemode).

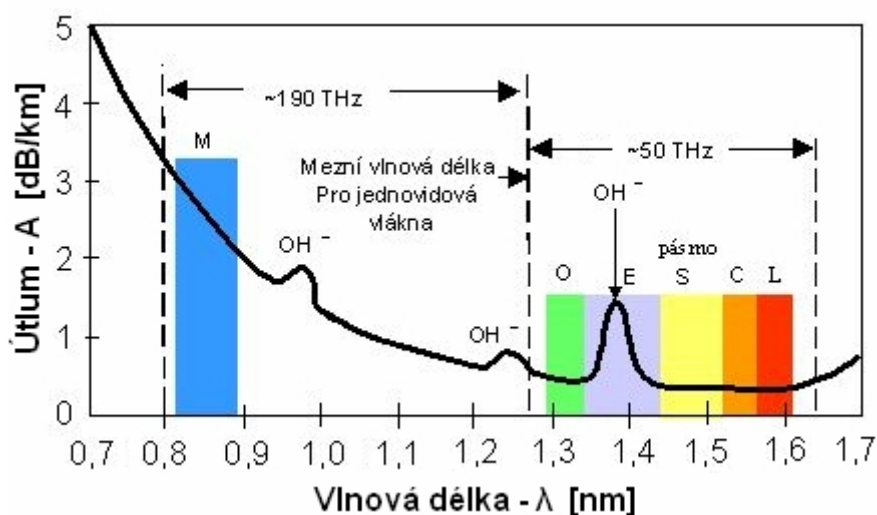
- **Mnohovidová optická vlákna - MM (Multimode)**

Může se jím současně šířit více světelných paprsků - modů, vidů. Vyrábějí se se skokovou změnou indexu lomu pod označením SI - MM (Step Index Multimode) nebo s pozvolnou změnou indexu lomu pod označením GI - MM (Graded Index Multimode). U SI - MM vláken se světlo šíří úplným odrazem a jednotlivé vidy z důvodů různé grupové rychlosti mohou projít optickým vláknem v různém čase. Zatímco u GI - MM vlákna dochází k nepřetržitému

lomu světla a jednotlivé vidy z důvodů proměnného indexu lomu mohou projít optickým vláknem ve stejném čase.

U optických vláken používaných v datových sítích se používají mnohavidová vlákna o průměrech 50/125 μm (standard ITU-T podle G.651) nebo 62,5/125 μm (používá se především v USA). V telekomunikacích se dnes výhradně používají jednovidová vlákna o průměru 9/125 μm .

Útlumová charakteristika křemíkových optických vláken na obrázku 2.2 vykazuje několik vrcholů a mezi nimi jsou úseky s nižším útlumem, kterým se říká přenosová okna (M vhodné pro mnohavidový přenos a O, E, S, C, L vhodných pro jednovidový přenos). [2]



Obrázek 2.2: Útlumová charakteristika optických vláken [2]

Z hlediska přenosu napájecího a datového signálu prostřednictvím přenosového systému TDM nebo WDM mají zásadní význam mnohavidová vlákna 62,5/125 μm (GI nebo SI) případně 50/125 μm (GI nebo SI) a to v oblasti přenosových oken M (okolo 850 nm) a O (okolo 1300 nm).

2.2 HLAVNÍ PARAMETRY OPTICKÝCH VLÁKEN

Základními parametry optického vlákna jsou [1]:

- **Útlum** - udává, jak mnoho světelné energie světelný puls ztratí během své cesty optickým vláknem. Je udáván v dB a koeficient útlumu v dB / km.
- **Disperze** - je příčinou zkreslení přijímaného signálu. Disperzi lze rozdělit na vidovou disperzi, chromatickou disperzi a polarizační disperzi.
- **Šířka pásma** - udává nejvyšší kmitočet signálu, který může být spolehlivě přenesen na vzdálenost 1 km délky vlákna. Je udávána v MHz.km.
- **Numerická apertura** - je definovaná jako největší úhel, pod kterým může světelný paprsek vstupovat do optického vlákna tak, aby byl vláknem přenášen.
- **Obsah iontů OH⁻** - je zbytková vlhkost, která byla ve vlákně ponechána v průběhu výrobního procesu ve formě iontů OH⁻.

2.3 VÝHODY OPTICKÝCH VLÁKEN

Oproti metalickým vodičům mají optická vlákna následující výhody [5]:

- **Velká šířka pásma** - zajišťuje obrovský potenciál přenášených rychlostí.
- **Nízký útlum** - vzhledem k nízkému útlumu je možný dosah desítky km bez nutnosti zapojení aktivních prvků, tak jako je tomu u metalických sítí.
- **Odolnost proti elektromagnetické interferenci** - u optických vláken neexistují přeslechy a díky použité technologii je lze použít v silně elektromagneticky rušeném prostředí.
- **Bezpečnost přenosu** - přenášené světlo optickým vláknem nevyzařuje do okolí, těžko se dá vyvázat a v případě vyvázání dojde k poklesu signálu na koncovém zařízení a to tak může vyvázání detekovat.
- **Dostupnost materiálu pro výrobu vláken** - vlákna se vyrábějí z křemíku, který není významně strategickou surovinou, jelikož je ho všude dostatek.
- **Menší průměr a nižší hmotnost kabelů.**

3. ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

V optických vláknových přenosových systémech se jako zdroje optického záření obecně používají luminiscenční a laserové diody.

3.1 POŽADAVKY NA ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

Základními požadavky na zdroje optického záření užívané v přenosových systémech TDM, WDM a dalších jsou [7]:

- **Světelný výkon**

Výkon zdroje optického záření musí být alespoň takový, aby signál prošlý vláknem a přijímaný detektorem byl s požadovanou přesností detekovatelný.

- **Přenosová rychlost**

K dosažení požadované přenosové rychlosti musí zdroj optického záření umožnit odpovídající modulaci.

- **Nominální poloha středu spektrální čáry a její šířka**

Spektrální čára zdrojů optického záření vícekanálových WDM systému se nesmí vlivem změn teploty ani jiných okolností posunout do polohy příslušející jiným kanálům.

V případě navrhovaného přenosového systému WDM se uvažuje, že budou spektrální čáry obou kanálů od sebe dostatečně odděleny ve velkém rozmezí, takže tento požadavek nebude v rámci této práce podstatný.

- **Šum**

Zdroj optického záření nesmí vykazovat náhodné fluktuace.

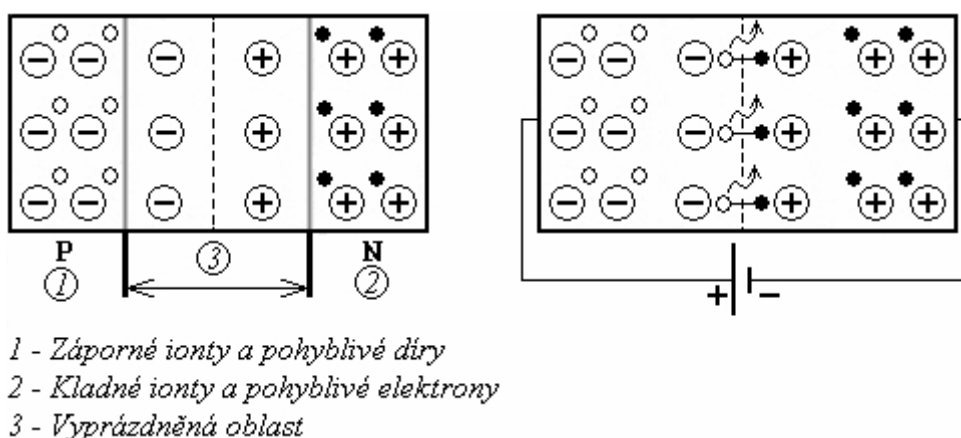
Dále se u zdrojů záření vyžaduje mechanická odolnost, necitlivost na změny okolního prostředí (teplotu, vlhkost, okolní vlivy), spolehlivost, nízká cena a dlouhá životnost.

3.2 LUMINISCENČNÍ DIODY

U zdrojů optického záření jako jsou luminiscenční neboli LED (Light Emitting Diode) diody se při průchodu proudu v propustném směru využívá zářivé

rekombinace elektronů a děr na přechodu polovodiče PN, jak je vidět na obrázku 3.1 [5]. Rekombinace je spontánní, proto vzniká samovolná emise světla. LED diody jsou tedy zdrojem nekoherentního záření, kdy vzniklé záření má zcela nahodilou fázi, frekvenci a amplitudu.

Světlo v polovodiči vzniká tím, že elektron v obalu atomu polovodiče obsahuje nižší orbitální dráhu kolem jádra atomu. Jelikož se jedná o dráhu s nižší energií, musí se přebytečné energie zbavit vyzářením v podobě fotonů. Pokud jsou fotony ve viditelném spektru světla, tak mluvíme o zářivém přechodu.



Obrázek 3.1: PN přechod LED diody bez napětí a s přiloženým napětím [5]

LED diody se zhotovují ve dvou základních provedeních - povrchově a hranově emitující. Hranově emitující diody se oproti povrchově emitujícím diodám vyznačují především vyšším vyzařovaným výkonem s užší spektrální čarou za cenu větší složitosti výroby. Ale pro použití ve vícekanálových WDM systémech jsou jejich výkony příliš malé a spektrální čáry příliš široké.[7]

3.3 LASEROVÉ DIODY

Laserová dioda nebo též polovodičový laser je polovodičová dioda, na jejímž PN přechodu dochází k přeměně elektrické energie na světlo. Na rozdíl od LED diod se generuje světlo odpovídající svými vlastnostmi světlu laseru. Základem funkce všech laserů je proces stimulované emise. Laserové diody jsou tedy zdrojem

koherentního záření, kdy vzniklé záření se vyznačuje vysokou směrovostí svazku, monochromaticností, koherencí a vysokou zářivostí. [4]

Základním stavebním prvkem každého laseru je rezonátor, kde dochází k zesílení světelného záření díky stimulované emisi. Optickým rezonátorem se rozumí dutina obklopená odrazovými plochami, v níž je pasivní dielektrické prostředí. Odrazy záření v rezonátoru se využívají k dosažení inverzní populace. Energetické pole v dutině rezonátoru má charakter stojatých vln. Vlivem destruktivní a nedestruktivní interference vln, které se odrážejí od stěn, se ustálí elektromagnetické pole do tzv. módů (vidů). Módy se dělí se na podélné, příčné horizontální a příčné vertikální. Podélné módy tvoří základní vlnové spektrum laseru. Příčné módy vymezují vyzařovací charakteristiku laseru a profil emitovaného svazku. [4]

3.3.1 Přehled jednotlivých typů laserových diod

Podle vnitřní struktury se polovodičové lasery dělí na [4]:

- homostrukturní lasery (Homostructure Laser) „HoL“,
- heterostrukturní lasery (Heterostructure Laser) „HL“,
- lasery s rozloženou zpětnou vazbou (Distributed Feed Back Laser) „DBFL“,
- lasery s kvantovými jámami (Quantum Wells Laser) „QWL“.

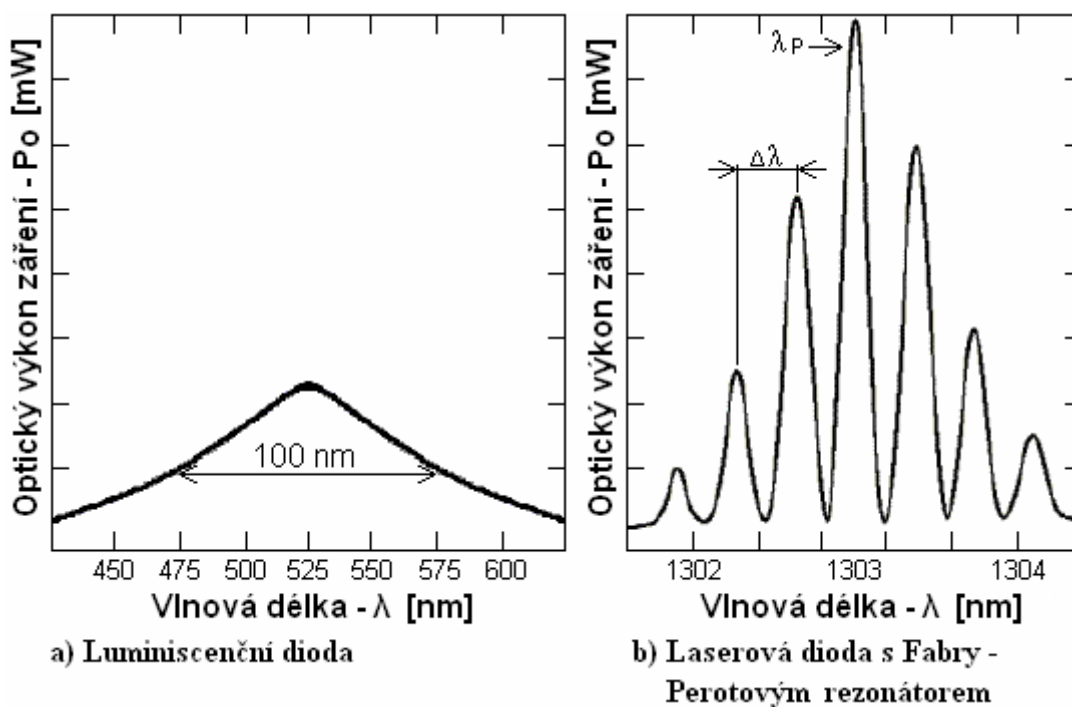
Podle konstrukce - místa vyzařování se polovodičové lasery dělí na [4]:

- hranově vyzařující lasery (Edge Emitting Laser) „EEL“,
- plosně vyzařující lasery (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) „VCSEL“.

3.3.2 Fabry - Perotův rezonátor

U polovodičových diod se nejčastěji používá Fabry - Perotův rezonátor. Je to optické zařízení tvořené dvěma paralelními, rovnoběžnými, rovinnými, částečně odrazovými plochami (zrcadly), které jsou vytvořené odštípnutím krystalu v krystalografických rovinách nebo se využívá i složitějších typů rezonátoru, kde se místo zrcadel používá hranol či difrakční mřížka ke zlepšení kvality generovaného světelného záření. [4]

Než je světlo vyzářeno z dutiny polovodiče laserové diody s F - P rezonátorem, tak se několikrát odrazí od krajních zrcadel rezonátoru, přičemž prochází aktivním prostředím tam a zpět. Tak dochází k zesílení světelného záření díky stimulované emisi.



Obrázek 3.2: Porovnání spekter luminiscenční a laserové diody

3.3.3 Hlavní parametry laserových diod

- **L - I charakteristika**

Nejdůležitější charakteristikou laserové diody je její L - I charakteristika. Je to závislost jejího výstupního optického výkonu na procházejícím pracovním proudu (ve měření této práce je to funkce $P_O = f(I_P)$).

- **Saturace L - I charakteristiky**

Ideální průběh L - I charakteristiky nad prahovým proudem je lineární. V praxi ovšem můžeme pozorovat nejrůznější nelinearity. Pro velké proudy v oblasti výkonového maxima nastává u laserových diod tzv. saturace (nasyčení), která se projeví zakřivením L - I charakteristiky. Tento jev lze v

menší míře pozorovat při vyšších teplotách i při menších proudech, kdy se L - I charakteristika ohýbá směrem k proudové ose.

- **Prahový proud - I_{TH}**

Při prahovém proudu v L - I charakteristice přechází laserová dioda do režimu stimulované emise a začíná emitovat koherentní záření. S rostoucí teplotou hodnota prahového proudu vzrůstá a zhoršují se tak vlastnosti laserové diody.

- **Diferenciální účinnost - η**

Vyjadřuje hodnotu intenzity (optického výkonu) vyzařovaného světla s přírůstkem pracovního proudu laserové diody. Je vyjádřena sklonem (směrnicí) L - I charakteristiky nad prahovým proudem.

- **Spektrum laserových diod - $\Delta\lambda$**

Spektrum je soubor vlnových délek, na kterých laserová dioda vyzařuje. Oproti LED diodě (šířka spektra až 100 nm) je spektrum laserové diody velmi úzké (desetiny až jednotky nm), což dovozuje přenos po optickém vlákně na velké vzdálenosti bez zkreslení signálu. S rostoucím pracovním proudem a teplotou se posouvá spektrum laserových diod směrem k vyšším hodnotám vlnových délek.

- **Divergence výstupního svazku - Θ**

Je způsobena difrakcí světelné vlny záření, když je vyvázena ven z laserové diody. Uvnitř laserové diody je světelná vlna omezena v aktivní vrstvě polovodiče. Velikost divergence je nepřímo úměrná tloušťce aktivní vrstvy polovodiče. Svazek vystupujícího záření má zpravidla eliptickou stopu. Divergence se uvádí v úhlových stupních v obou rovinách os elipsy.

Mezi další důležité parametry laserových diod se řadí:

- **Pracovní proud - I_P ,**
- **Pracovní napětí - U_P ,**
- **Výstupní optický výkon - P_O ,**
- **Provozní rozsah teplot - ΔT_P ,**

a další.[11]

4. DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

V optických vláknových přenosových systémech se jako detektory optického záření obecně používají fotodiody PIN a lavinové fotodiody APD. Jsou-li nároky na výstupní napětí velké, tak je možné použít i Photovoltaic Power Converter, se kterým je možné dosáhnout vyšších hodnot napětí než u fotodiod.

4.1 POŽADAVKY NA DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

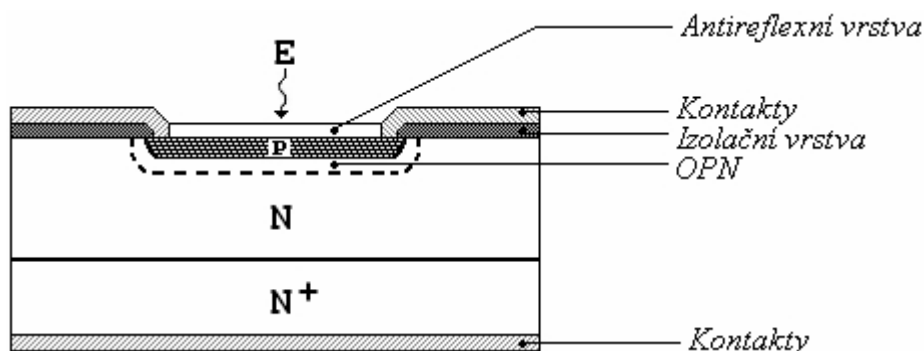
Základními požadavky na detektory optického záření (fotodetektory) užívané v přenosových systémech TDM, WDM a dalších jsou:

- **Citlivost** - fotodetektor musí mít velkou citlivost v oblasti pracovních vlnových délek.
- **Odezva** - fotodetektor musí mít co možná největší elektrickou odezvu na malý vstupní optický signál a zároveň co možná nejmenší dobu odezvy pro získání co největší šířky pásma.
- **Stabilita** - fotodetektor musí zajišťovat co možná nejlepší časovou a teplotní stabilitu převodních charakteristik.
- **Šum** - fotodetektor nesmí vykazovat téměř žádné náhodné fluktuace.

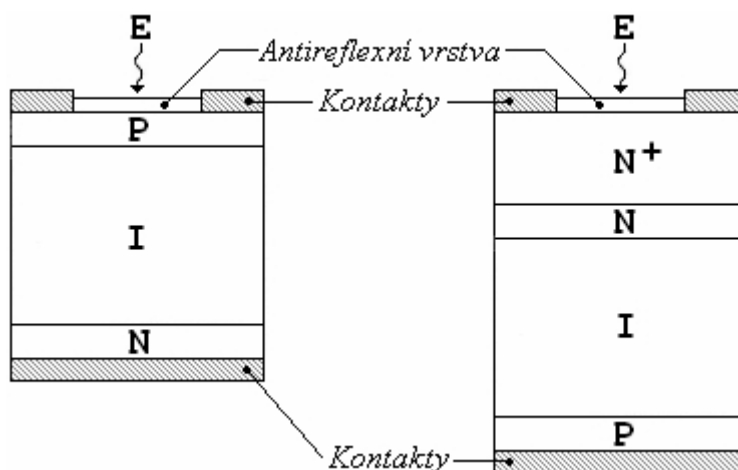
4.2 FOTODIODA PIN

Fotodiody je plošná polovodičová dioda konstrukčně upravená tak, aby do oblasti PN přechodu pronikalo světlo. Fotodiody reaguje na změny osvětlení velmi rychle, řádově 10^{-6} - 10^{-9} s. Struktura fotodiody je zobrazena na obrázku 4.1. [5]

Zvláštní konstrukce se používá u fotodiody PIN, která má mezi vrstvou přechodu P a N vloženou intrinzickou vrstvu I o extrémní vodivosti s velkou elektrickou pevností. Proto pracuje s velmi vysokými intenzitami elektrického pole v oblasti přechodu. Tím je dosaženo náběhu již v řádu 10^{-12} - 10^{-15} s a fotodiody PIN může být použita i pro vyšší přenosové rychlosti. Struktury fotodiod PIN jsou zobrazeny na obrázku 4.2. [5]



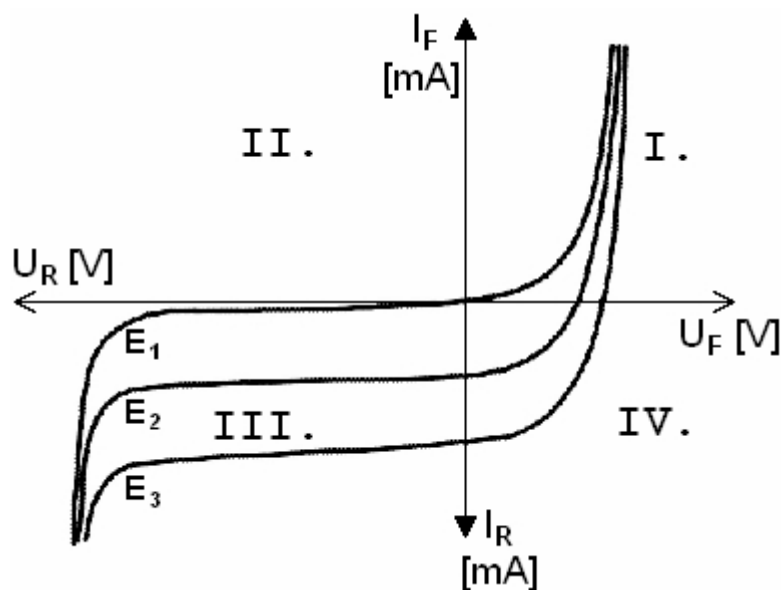
Obrázek 4.1: Struktura fotodiody



Obrázek 4.2: Struktury fotodiod PIN

Foton, který vstupuje do polovodiče s dostatečnou energií může být absorbován, přičemž vzniklý volný elektron a díra vytváří v polovodiči napětí (fotovoltaický jev) nebo zvětšují jeho vodivost (fotovodivostní jev).

V - A charakteristika fotodiody a fotodiody PIN prochází třemi kvadranty (I., III. a IV. kvadrantem), přičemž využíváme jen III. a IV. kvadrant. V III. kvadrantu pracuje fotodioda ve fotovodivostním režimu a chová se jako rezistor citlivý na světlo. Ve IV. kvadrantu pracuje dioda ve fotovoltaickém režimu, zde se dioda chová jako zdroj elektrické energie. V - A charakteristika obou typů fotodiod je zobrazena na obrázku 4.3. [5]



Obrázek 4.3: V - A charakteristika fotodiody a fotodiody PIN [5]

4.2.1 Hlavní parametry fotodiód

- **Citlivost fotodiód - S**

Citlivost fotodiód určuje optický výkon ekvivalentní šumu NEP (noise equivalent power). Jehož velikost odpovídá hodnotě ekvivalentnímu dopadajícímu optickému výkonu světelného záření na fotodiodu, a který na výstupu fotodiody vyvolal úroveň signálu rovnou úrovni přítomného šumu. Grafický průběh tohoto parametru by měl mít téměř lineární tvar. [5]

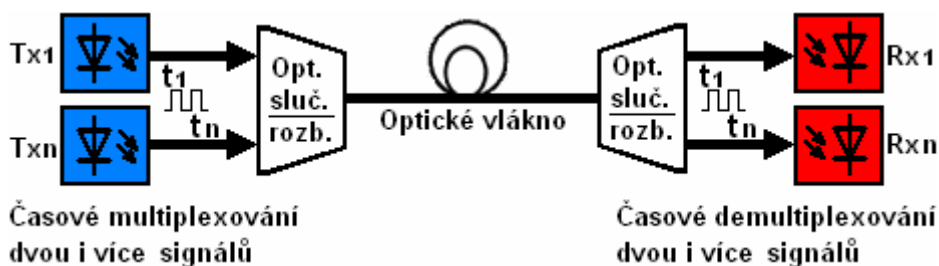
Mezi další důležité parametry laserových diód se řadí:

- **propustný proud fotodiódou - I_F ,**
- **závěrný proud fotodiódou - I_R ,**
- **závěrné napětí na fotodiódě - U_R ,**
- **citlivost v oblasti vlnových délek - λ ,**

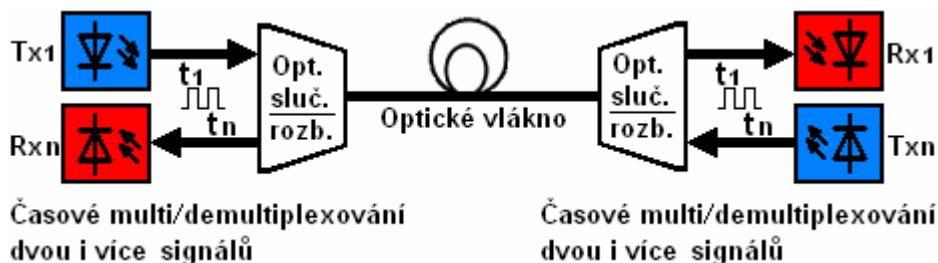
a další.

5. TECHNIKA TDM PŘENOSŮ SIGNÁLŮ

Časové dělení neboli TDM (Time Division Multiplex) je technika multiplexování, která umožňuje různými zdroji časově využívat jenom jednu linku [6]. V případě navrhovaného TDM systému je jedno optické vlákno využíváno dvěma zdroji optického záření pro přenos napájecího a datového signálu, což je realizováno pomocí optických slučovačů / rozbočovačů.



Obrázek 5.1: Zjednodušené obecné blokové schéma jednosměrného TDM



Obrázek 5.2: Zjednodušené obecné blokové schéma obousměrného TDM

Optické signály lze přenášet paralelně po optickém vlákne v jednom směru nebo v obou směrech, kdy se při multiplexování pracuje v jednom z následujících režimů. [6]

- **Režim synchronního časového multiplexu**, ve kterém jsou data vkládány do předem definovaných časových intervalů a vytvářejí tak spojitý tok elementárních intervalů.
- **Režim statického (paketového) časového multiplexu**, ve kterém se na přenosové cestě střídají odesílané datové jednotky dle určitého principu jejich příchodu do řídicí jednotky časového multiplexu.

- **Režim asynchronního časového multiplexu**, ve kterém jsou data vkládány do časových intervalů s přesně definovanou délkou. Data jsou do intervalu vloženy tehdy, kdykoliv je volný interval k dispozici. Výsledkem je velmi pružný systém, který nemá pevnou strukturu. Nerozlišuje se kolik a jakého typu provozu putuje v libovolně definovaném okamžiku systémem, z čehož vyplývá, že asynchronní přenosový režim je schopen potenciálně zpracovat jakoukoliv službu tzv. je schopen poskytnout libovolnou šířku pásma.

5.1 OPTICKÉ SLUČOVAČE / ROZBOČOVAČE

Optické vláknové slučovače / rozbočovače jsou pasivní optické prvky, které slouží k rozdělení optického výkonu světelného záření do více optických vláken nebo také ke sloučení optických signálů z více vláken do jediného optického vlákna jsou teda vhodné pro použití ve dvoukanálovém přenosovém systému TDM. Optické slučovače / rozbočovače nejsou závislé na přenosovém režimu ani na rychlosti přenosu.

5.1.1 Hlavní parametry optických slučovačů / rozbočovačů

- **Poměr odbočení optického signálu (vazební poměr)**

U optických slučovačů / rozbočovačů je nejdůležitějším parametrem poměr odbočení optického signálu, podle kterého dojde k rozdělení příchozího optického výkonu signálu do dvou směrů. Typicky je možné koupit optické slučovače / rozbočovače s vazebním poměrem: 50 na 50 %, 70 na 30 % a 90 na 10 %. [20]

Mezi další důležité parametry optických slučovačů / rozbočovačů se řadí:

- **typ optického vlákna vývodů,**
- **vlnové délky odbočovaného optického signálu,**
- **vložené ztráty optických tras multiplexeru,**
- **izolace kanálů multiplexeru,**
- **polarizační ztráty,**

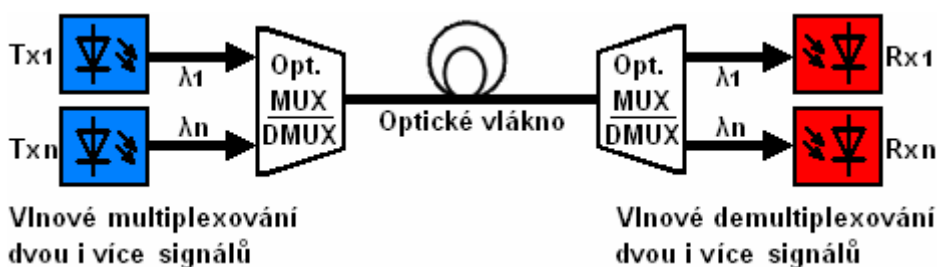
a další.

6. TECHNIKA WDM PŘENOSŮ SIGNÁLŮ

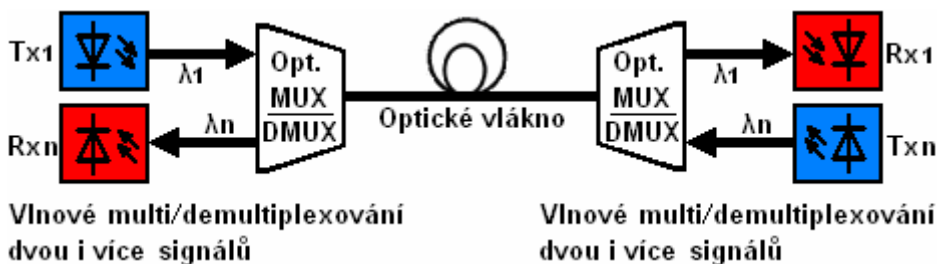
Vlnové dělení neboli WDM (Wavelength - Division Multiplexing) je technologie, která umožňuje multiplexovat optické signály pracující na různých vlnových délkách, a tak je přenášet paralelně po optickém vlákně v jednom směru nebo v obou směrech, přičemž každá z vlnových délek poskytuje šířku pásma dosud nabízenou celým jedním optickým vláknem [8]. Základními prvky WDM umožňující vlnovou multiplexaci jsou optické multiplexery / demultiplexery (dále označované MUX / DMUX).

S WDM může každá vlnová délka přenášet uživatelský provoz o různé rychlosti a v různém formátu (SONET, Ethernet, Asynchronous Transfer Mode - ATM, Storage Area Network - SAN, Dynamic Packet Transport - DPT), a tak se zvyšuje využitelná šířka pásma optického vlákna i využitelnost pro různé služby. [9]

WDM bylo dále rozšířeno na tzv. husté vlnové dělení neboli DWDM (Dense WDM) s rozestupy optických nosných vlnových délek po 1 nm a dále na tzv. hrubé vlnové dělení neboli CWDM (Coarse WDM) s rozestupy optických nosných vlnových délek nad 10 nm. [9]



Obrázek 6.1: Zjednodušené obecné blokové schéma jednosměrného WDM



Obrázek 6.2: Zjednodušené obecné blokové schéma obousměrného WDM

6.1 OPTICKÉ MULTIPLEXERY / DEMULTIPLEXERY

Optické multiplexery a demultiplexery jsou v zásadě stejná zařízení a lze je použít ke sloučení optických signálů jednotlivých zdrojů optického záření vybraných vlnových délek do jediného optického vlákna. Nebo je lze použít k rozdělení příchozího optického signálu na jednotlivé kanály vybraných vlnových délek a jejich následné přivedení na příslušný detektor optického záření.

Optické multiplexery / demultiplexery lze realizovat několika způsoby.

6.1.1 Optické MUX / DMUX realizované jako soustava dielektrických filtrů

V uspořádání demultiplexeru jako soustavy dielektrických filtrů dopadá optický signál WDM na první filtr. Ten propustí první kanál (λ_1) optického signálu na první detektor optického záření, zbylé kanály se odrazí na druhý filtr. Druhým filtrem projde druhý kanál (λ_2) optického signálu na druhý detektor optického záření, ostatní kanály (λ_n) se odrazí na třetí filtr, atd. až poslední optický kanál z původního optického signálu WDM dopadne na poslední detektor optického záření. [7]

Toto uspořádání lze použít i při realizaci multiplexeru, kdy jednotlivé optické signály přivedeme v opačném směru a tak na výstupu vyjde signál WDM.

6.1.2 Optické MUX / DMUX realizované vlnovody uspořádanými do mřížky

Při uspořádání demultiplexeru jako AWG (Arrayed Waveguide Grating) je na vlákno navařen vlnovod, který se hodně rozšiřuje, a po krátké vzdálenosti pokračuje několika úzkými vlnovody, svými rozměry podobnými původnímu vláknu. Ty vedou paralelně vedle sebe a poněkud zatáčejí, takže vytvářejí přibližně soustředné oblouky a jsou nestejně dlouhé. Posléze se opět spojují do širokého vlnovodu, který po krátké vzdálenosti ústí opět do úzkých vlnovodů. Těchto výstupních větví je stejně jako příspěvkových optických kanálů v signálu WDM. Přesné geometrické parametry a index lomu struktury AWG je přitom spočítán tak, že výkon světla vstupujícího do prvního širokého místa se rovnoměrně rozdělí do všech úzkých větví. Těmi se šíří

dále až ke druhému širokému místu. Protože jsou větve různě dlouhé, vstupují části signálu z jednotlivých větví do druhého širokého místa s nestejným fázovým zpožděním. Výsledkem je, že ve druhém širokém místě dojde k vzájemné interferenci části signálu přicházejících z různých větví a celý signál WDM se rozdělí tak, že veškerá intenzita prvního příspěvkového kanálu se objeví v první výstupní větvi, veškerá intenzita druhého příspěvkového kanálu se objeví v druhé výstupní větvi, atd. až veškerá intenzita posledního příspěvkového kanálu se objeví v poslední výstupní větvi struktury AWG. [7]

Použijeme-li strukturu AWG při realizaci multiplexeru a přivedeme jednotlivé optické signály v opačném směru, tak na výstupu vyjde signál WDM.

6.1.3 Optické MUX / DMUX realizované vláknovou Braggovou mřížkou

Ve třetím případě je základem demultiplexeru Braggova mřížka nebo FBG (Fibre Bragg Grating), která dokáže odrazit příslušné vlnové délky optického signálu a zbylou vlnovou délku tohoto signálu propustí na příslušný detektor optického záření. [7]

Použijeme-li strukturu FBG při realizaci multiplexeru a přivedeme jednotlivé optické signály v opačném směru, tak na výstupu vyjde signál WDM.

6.1.4 Hlavní parametry optických multiplexerů / demultiplexerů

Mezi nejdůležitější parametry optických multiplexerů / demultiplexerů se řadí:

- **typ optického vlákna vývodů,**
- **vlnové délky, na kterých lze multiplexovat optické signály,**
- **vložené ztráty optických tras multiplexeru,**
- **izolace kanálů multiplexeru,**

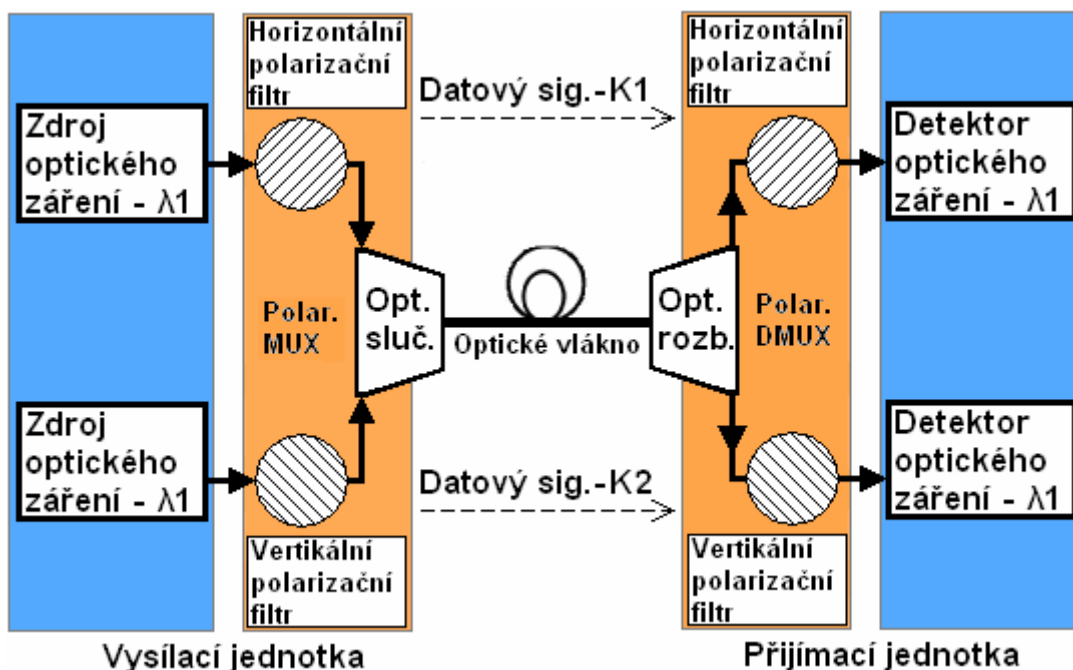
a další.

7. TECHNIKA PDM PŘENOSŮ SIGNÁLŮ

Technika polarizačního multiplexu neboli PDM (Polarization - Division Multiplex) využívá rozdílné (ortogonální) polarizace dvou optických signálů pro přenos po jednom optickém vlákně. Touto technikou přenosu lze přenášet pouze dva optické signály po jednom optickém vlákně a to v jednosměrném nebo v obousměrném režimu. Zdroje obou optických signálů mohou pracovat na stejné nebo různé vlnové délce. Na obrázku 7.1 je zobrazeno blokové uspořádání jednosměrného dvoukanalového přenosového systému PDM [10].

Základními prvky přenosového systému PDM jsou polarizační multiplexery, které umožňují zároveň polarizovat optické signály dvou optických zdrojů v navzájem pravouhlém směru do jednoho optického vlákna. Oba optické signály jsou polarizovány pomocí vertikálního a horizontálního polarizačního filtru. Na konci optického vlákna jsou polarizované optické signály depolarizovány opět pomocí polarizačních filtrů, které jsou součástí polarizačního demultiplexeru.

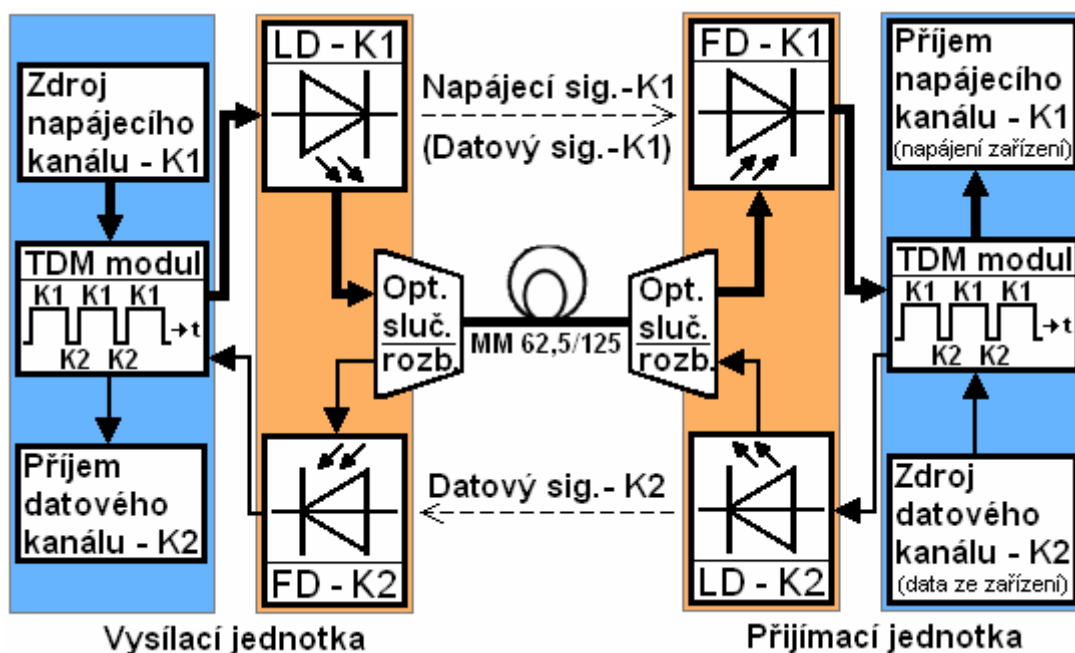
Tento přenosový systém lze použít k zdvojnásobení přenosu dat po jednom optickém vlákně.



Obrázek 7.1: Jedsměrný dvoukanalový přenosový systém PDM

8. NÁVRH PŘENOSOVÝCH SYSTÉMŮ

8.1 NÁVRH PŘENOSOVÉHO SYSTÉMU TDM



Obrázek 8.1: Obousměrný dvoukanálový přenosový systém TDM

Na obrázku 8.1 je zobrazeno blokové uspořádání obousměrného dvoukanálového přenosového systému TDM. Toto uspořádání je možno použít pro napájení určitého zařízení (např. kamery, mikrofону, snímače) prostřednictvím optického vlákna a zpětný přenos dat po též optickém vlákne. Po menší úpravě je možné zapojení použít i v jednosměrném režimu.

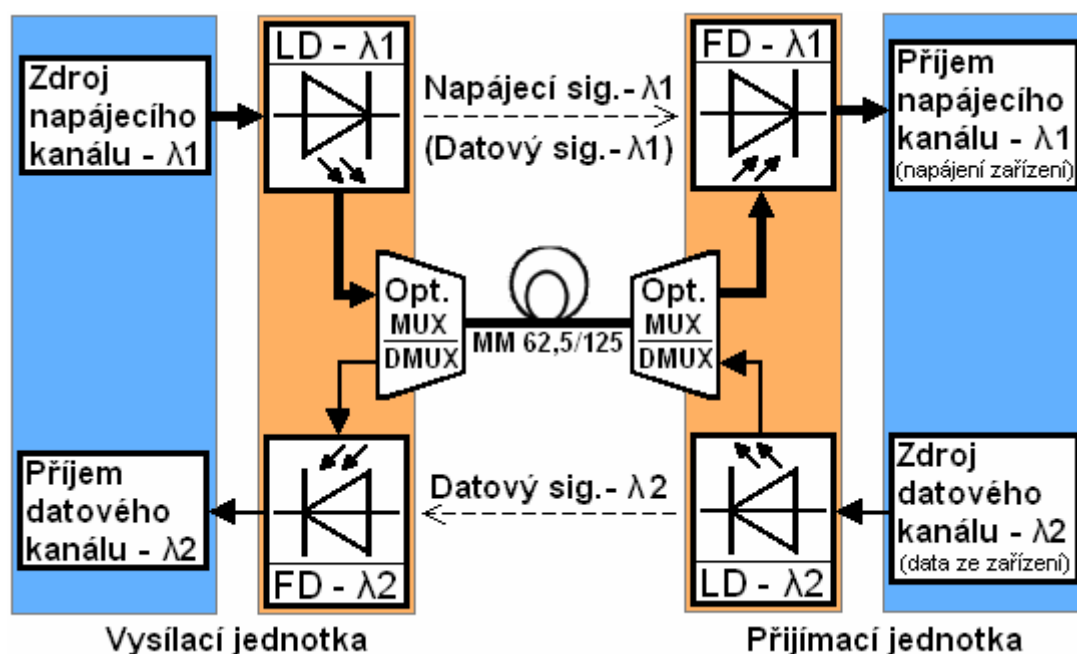
Pro využití jednoho optického vlákna pro přenos dvou signálů se využívají optické slučovače / rozbočovače, které jsou instalovány na každém konci vlákna. Poměr rozdělení optického výkonu signálu u obou slučovačů / rozbočovačů by měl být pro napájecí signál co nejvyšší, nejlépe 90 % a pro datový signál může být přiděleno zbylých 10 %. Prostřednictvím větví s 90 % propustností signálu optických slučovačů / rozbočovačů se přenáší optický napájecí signál a to při horní úrovni časového signálu t modulu TDM. Prostřednictvím větví s 10 % propustností signálu

optických slučovačů / rozbočovačů se přenáší optický datový signál a to při dolní úrovni časového signálu t modulu TDM.

Jako zdroj záření napájecího kanálu může být použita výkonová laserová dioda (označená LD - K1) a pro datový kanál může být použita nízko - výkonová laserová dioda (označená LD - K2). Pro převod optického signálu napájecího a datového kanálu na napětí mohou být použity fotodiody PIN (označené FD - K1 a FD - K2). Vlnové délky jednotlivých zdrojů a detektorů optického zařízení mohou být zvoleny libovolně, nejlépe v rozmezí 800 - 1300 nm (viz obrázek 2.1.2), protože na vyšších vlnových délkách roste cena jednotlivých laserových diod a vyrábějí se max. do jednotek mW výstupního optického výkonu a to většinou pro přenos po jednovídných vláknech.

Všechny zvolené komponenty by měli být uzpůsobeny pro MM optická vlákna 62,5/125 μm (GI nebo SI) případně 50/125 μm (GI nebo SI).

8.2 NÁVRH OPTICKÉHO PŘENOSOVÉHO SYSTÉMU WDM



Obrázek 8.2: Obousměrný dvoukanalový přenosový systém WDM

Na obrázku 8.2 je zobrazeno blokové uspořádání obousměrného dvoukanalového přenosového systému WDM. Toto uspořádání je opět možno použít

pro stejné účely jako TDM. Po menší úpravě je možný i provoz v jednosměrném režimu.

Energie potřebná pro napájení přijímací jednotky je dodávána výkonovou laserovou diodou (označenou LD - λ_1) pracující na vlnové délce λ_1 nejlépe okolo 850 nm (viz obrázek 2.1.2). Pro převod optického signálu (napájecího kanálu) na napájecí napětí je možné použít fotodiodu PIN (označenou FD - λ_1) citlivou v oblasti vlnových délek λ_1 a schopnou pojmout vysoký optický výkon přenášeného signálu.

Pro vysílání dat z přijímací jednotky je možné použít laserovou diodu LD (označenou LD - λ_2) o nižším optickém výkonu pracující na vlnové délce λ_2 nejlépe okolo 1300 nm (viz obrázek 2.1.2). Pro převod optického signálu (datového kanálu) na napětí ve formě přenášených dat je možné opět použít fotodiodu PIN (FD - λ_2) citlivou v oblasti vlnových délek λ_2 .

Všechny zvolené komponenty by měly být uzpůsobeny pro MM optická vlákna 62,5/125 μm (GI nebo SI) případně 50/125 μm (GI nebo SI).

8.3 VÝBĚR KOMPONENTŮ PRO SYSTÉM WDM A TDM

Na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce byly školou zakoupeny komponenty potřebné pro realizaci systému TDM a WDM (viz tabulka 8.1).

Tabulka 8.1: Seznam komponentů zakoupených pro realizaci TDM a WDM

Označení na obr. 7.1	Označení na obr. 7.2	Prodejní název	Výrobce	Cena [Kč / ks]	Katalogové hodnoty
LD - K1	LD - λ_1	SPL 2F81	SIEMENS	30 000	viz tabulka 8.2
LD - K2	LD - λ_2	PL13B002ST83-S-0	LASER COMPONENTS	5 400	viz tabulka 8.3
FD - K1	FD - λ_1	3 WN 16620	TESLA	2 000	viz tabulka 8.4
FD - K2	FD - λ_2	PDINP075ST83-Z-0	LASER COMPONENTS	2 750	viz tabulka 8.5
sluč. / rozb.	-	FCMM625-90A-FC	THORLABS	3 500	viz tabulka 8.6
-	MUX / DMUX	MX.062.0813.32-1	LASER COMPONENTS	14 000	viz tabulka 8.7

9. POPIS KOMPONENTŮ PRO TDM A WDM

Přenosový systém TDM není závislý na vlnové délce přenášeného záření, proto je možné použít ty samé laserové diody a fotodiody z WDM i pro TDM. Ale z hlediska levnějšího návrhu systému TDM by bylo vhodnější použít všechny komponenty pracující na stejné vlnové délce (např. okolo 800 nm).

9.1 ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

Podle rozboru jednotlivých zdrojů optického záření, uvedených v kapitole 3, použitelných pro přenosový systém TDM a WDM, je nejvhodnější použít laserové diody (označované LD) jako zdroj optického napětového a datového signálu. Mnohé z pouzder LD určených pro telekomunikace obsahují odrazné zrcátko a čočku, která fokusuje vycházející záření. To se výhodně využívá při zavádění záření do optických vláken. Laserové diody se pro připojení optického vlákna vyrábějí ve dvou provedeních. [4]

- **Laserové diody konektorované (Receptacle),**
kdy je LD je opatřena adaptérem pro připojení konektoru optické vlákna.
- **Laserové diody s optickým vláknem (Pigtail),**
kdy je optické vlákno přímo napojeno na pouzdro LD.

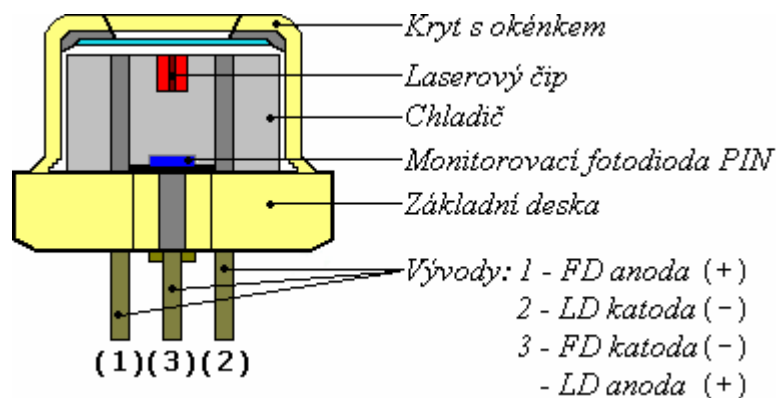
U LD s integrovanou fotodiodou PIN se využívá vlastnost, že světelné záření může vycházet z laserového čipu dopředu i dozadu, je tedy možné zadní světlo použít k monitorování optického výkonu. Za monitorovací diodu bývá většinou zvolena PIN fotodioda, která je umístěna v pouzdru v blízkosti laserového čipu. Tato dioda má alespoň jeden vývod samostatný a lze ji zapojit ve fotovodivostním či ve fotovoltickém režimu. Procházející proud fotodiodou je přímo úměrný záření laseru.

Pouzdro obyčejné běžně dostupné laserové diody se většinou skládá z vlastního laserového čipu, monitorovací PIN diody, základní desky, na které jsou tyto části připevněny, vývodů, spojů a krytu s okénkem. Řez pouzdem laserové diody v čteně popisu je zobrazen na obrázku 8.1. [3]

9.1.1 Katalogové hodnoty zvolených laserových a LED diod

Tabulka 9.1: Laserová dioda s integrovanou fotodiodou PIN [15]

Laserová dioda U-L-650543A (T _P = 25 °C)						
Parametr	Symbol	Podmínka	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Prahový proud	I _{TH}	P _O = 5 mW	-	12	25	mA
Pracovní proud	I _P	P _O = 5 mW	-	18	25	mA
Pracovní napětí	U _P	-	-	2,1	2,5	V
Závěrné napětí - laser	U _R (LD)	-	2			V
Diferenciální účinnost	η	4 až 1 mW	0,4	0,8	-	mW / mA
Vlnová délka záření	λ	P _O = 5 mW	640	655	660	nm
Divergence svazku	Θ ∥	P _O = 5 mW	5	9	12	°
	Θ ⊥	P _O = 5 mW	30	36	42	°
Výstupní optický výkon	P _O	-	5			mW
Monitorovací fotodioda PIN v U-LD-650543A (T _P = 25 °C)						
Parametr	Symbol	Podmínka	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Závěrné napětí - PIN	U _R (PIN)	-	30			V
Monitorovací proud	I _M	P _O = 5 mW	0,05	0,3	0,5	mA
Provozní vlastnosti – U-LD-650543A						
Parametr	Symbol	Podmínka	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Provozní rozsah teplot	ΔT _P		- 10 ~ + 40			°C
Konstrukční vlastnosti - U-LD-650543A						
Pouzdro + provedení	TO - 18 (5,6 mm) bez skleněného okénka a konektoru					



Obrázek 9.1: Řez pouzdrem laserové diody U-LD-650543A

Tabulka 9.2: LED diody pro měření spektrální charakteristiky fotodiody

Diody LED (5 mm)	Pracovní napětí	Pracovní proud	Vlnová délka	Svítivost	Vyzařovací úhel
	U_P [V]	I_P [mA]	λ [nm]	I_v [mcd]	α [°]
LED1	3,3	30	470	4500	10
LED2	2,1	20	525	13000	10
LED3	2,1	20	590	13000	10
LED4	2,1	20	624	13000	10
LED5	2,1	20	635	5000	10
UV a IR LED (5 mm)	Pracovní napětí	Pracovní proud	Vlnová délka	Vyzařovací výkon	Vyzařovací úhel
	U_P [V]	I_P [mA]	λ [nm]	P_O [mW]	α [°]
LED6	3,2	20	385 ~ 390	2	40
LED7	1,5 - 1,8	50	850	160	10

Tabulka 9.3: Laserová dioda pro napájecí kanál TDM a WDM [16]

Laserová dioda SIEMENS SPL 2F81 (T _P = 25 °C)					
Parametr	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Prahový proud	I _{TH}	0,40	0,45	0,55	A
Pracovní proud	I _P	1,3	1,5	1,8	A
Pracovní napětí	U _P	2			V
Závěrné napětí	U _R	-	-	3	V
Diferenciální účinnost	η	0,60	0,70	0,85	W / A
Vlnová délka záření	λ	803	808	813	nm
Spektrální šířka	Δλ	2			nm
Výstupní optický výkon	P ₀	-	-	0,8	W
Provozní vlastnosti - SIEMENS SPL 2F81					
Parametr	Symbol	Rozsah			Jednotka
Provozní rozsah teplot	T _P	- 10 ~ + 60			°C
Konstrukční vlastnosti - SIEMENS SPL 2F81					
Pouzdro + provedení	TO - 220 + konektorovaná (FC) pro SM nebo MM optická vlákna				



Obrázek 9.2: Laserová dioda SIEMENS SPL 2F81

Tabulka 9.4: Laserová dioda pro datový kanál TDM a WDM [17]

Laserová dioda LASER COMPONENTS PL13B002ST83-S-0 (T _P = 25 °C) (MITSUBISHI Laser Diode ML725B45F)						
Parametr	Symbol	Podmínka	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Prahový proud	I _{TH}	P _O = 5 mW	3	5	15	mA
Pracovní proud	I _P		10	20	35	mA
Pracovní napětí	U _P		-	1,1	1,5	V
Závěrné napětí - laser	U _R (L)		2			V
Diferenciální účinnost	η		0,3	0,4	0,7	mW / mA
Vlnová délka záření	λ		1290	1310	1330	nm
Spektrální šířka	Δλ		-	1	2	nm
Divergence svazku	Θ ∥		-	25	-	°
	Θ ⊥	-	30	-	°	
Výstupní optický výkon	P _O	-	10			mW
Monitorovací fotodioda PIN v PL13B002ST83-S-0 (T _P = 25 °C)						
Parametr	Symbol	Podmínka	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Propustný proud - PIN	I _F (PIN)	-	2			mA
Závěrné napětí - PIN	U _R (PIN)	-	20			V
Monitorovací proud	I _M	P _O = 5 mW U _R (PIN) = 1 V	-	2	-	mA
Proud za tmy	I _R	P _O = 5 mW U _R (PIN) = 10 V	-	-	3	μA
Provozní vlastnosti - PL13B002ST83-S-0						
Parametr	Symbol		Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Provozní rozsah teplot	ΔT _P		- 40 ~ + 85			°C
Konstrukční vlastnosti - PL13B002ST83-S-0						
Provedení	konektorovaná (ST) pro SM nebo MM optická vlákna					



Obrázek 9.3: Laserová dioda LASER COMPONENTS PL13B002ST83-S-0

9.2 DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

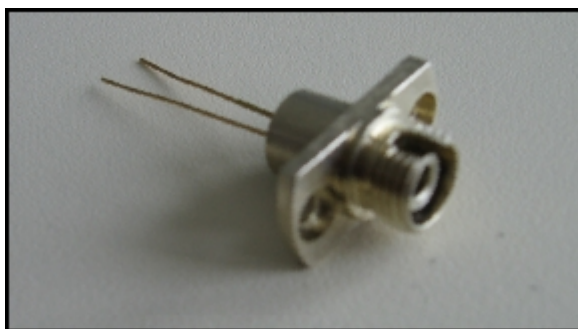
Podle rozboru jednotlivých detektorů optického záření, uvedených v kapitole 4, použitelných pro přenosový systém TDM a WDM je nejvhodnější použít fotodiody PIN (označované FD) jako detektor optického napěťového a datového signálu. Hlavní výhoda fotodiod PIN od obyčejných fotodiod je velmi rychlá odezva na přivedený optický signál

Fotodiody se pro připojení optického vlákna opět vyrábějí ve dvou provedeních - fotodiody konektorované (Receptacle) a fotodiody s optickým vláknem (Pigtail).

9.2.1 Katalogové hodnoty zvolených fotodiod PIN

Tabulka 9.5: Fotodioda pro napájecí kanál systému TDM a WDM [18]

Fotodioda TESLA 3 WN 166 20 (T _P = 25 °C)						
Parametr	Symbol	Podmínka	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Proud v propustném směru	I _F	-	100			mA
Napětí v závěrném směru	U _R	-	20			V
Proud za tmy	I _R	U _R = 20 V λ = 820 nm	0,40	1,00	5,00	nA
Citlivost	S	U _R = 5 V λ = 820 nm	0,40	0,47	5,00	A / W
Citlivost v oblasti vlnových délek	λ	-	820 ± 40			nm
Doba náběhu a doběhu	t	U _R = 5 V	1			ns
Konstrukční vlastnosti - TESLA 3 WN 166 20						
Provedení	konektorovaná (FC) pro SM nebo MM optická vlákna					



Obrázek 9.4: Fotodioda TESLA 3 WN 166 20

Tabulka 9.6: Fotodioda pro datový kanál systému TDM a WDM [19]

Fotodioda LASER COMPONENTS PDINP075ST83-Z-0 (T _P = 25 °C)					
Parametr	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Proud v propustném směru	I _F	10			mA
Napětí v závěrném směru	U _R	20			V
Proud v závěrném směru	I _R	2			mA
Citlivost	S	0,8	0,9	-	A / W
Citlivost v oblasti vlnových délek	λ	1295 - 1325			nm
Provozní vlastnosti - PDINP075ST83-Z-0					
Parametr	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Provozní rozsah teplot	ΔT _P	- 40 ~ + 85			°C
Konstrukční vlastnosti - PDINP075ST83-Z-0					
Provedení	konektorovaná (ST) pro SM nebo MM optická vlákna				



Obrázek 9.5: Fotodioda LASER COMPONENTS PDINP075ST83-Z-0

9.3 OPTICKÝ SLUČOVAČE / ROZBOČOVAČE PRO TDM

Podle rozboru návrhu TDM systému, uvedeného v kapitole 7.1, je nejvhodnější použít dva optické slučovače / rozbočovače s poměrem rozdělení optického výkonu signálu 90 na 10 %.

Tabulka 9.7: Optické slučovače / rozbočovače pro navrhovaný systém TDM [20]

Optický slučovač / rozbočovač THORLABS FCMM625-90A-FC		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Optické vlákno	MM GI 62,5/125	μm
Vlnové délky	850 ± 40	nm
Vazební poměr	90/10	%
Vložené ztráty	12,0/1,2	dB
Polarizační ztráty	0,11	dB
Směrovost	>35	dB
Konstrukční vlastnosti - FCMM625-90A-FC		
Provedení	konektorovaný (FC) pro MM optická vlákna	



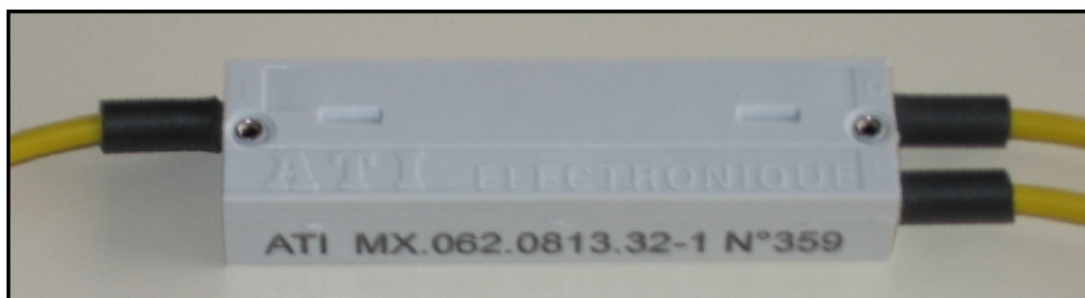
Obrázek 9.6: Optický slučovač / rozbočovač FCMM625-90A-FC

9.4 OPTICKÝ MULTIPLEXERY / DEMULTIPLEXERY PRO WDM

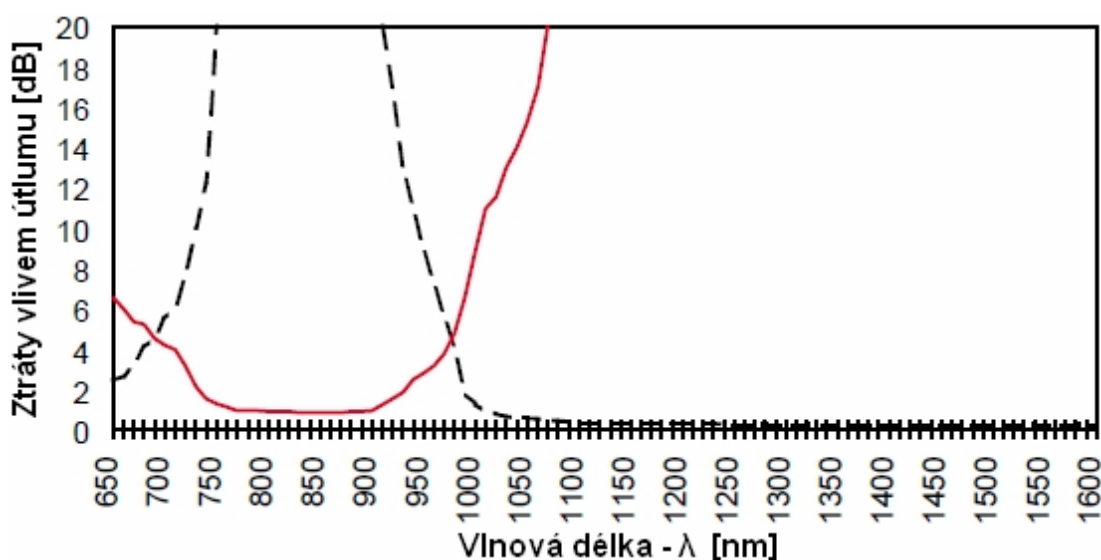
Podle rozboru návrhu WDM systému, uvedeného v kapitole 7.2, je nejvhodnější použít dva dvoukanálové optické multiplexery / demultiplexery (označované MUX / DMUX) s pracovními vlnovými délkami okolo 850 nm pro napájecí signál a 1300 nm pro datový signál.

Tabulka 9.8: Optické MUX / DMUX pro navrhovaný systém WDM [21]

Optický multiplexer / demultiplexer LASER COMPONENTS MX.062.0813.32-1			
Parametr		Hodnota	Jednotka
Optické vlákno		MM GI 62,5/125	μm
Vlnové délky		800 ~ 900	nm
		1200 ~ 1600	
Vložené ztráty	850 nm	< 1,2	dB
	1300 nm	< 0,8	
Izolace kanálů	850 nm	> 28,0	dB
	1300 nm		
Konstrukční vlastnosti - MX.062.0813.32-1			
Provedení		konektorovaný (ST) pro MM optická vlákna	



Obrázek 9.7: Optický MUX / DMUX MX.062.0813.32-1



Obrázek 9.8: Útlumová - spektrální charakteristika MX.062.0813.32-1 [21]

Seznam použitých přístrojů v následujících měřeních

Označení	Popis
Agilent - E3631A 0 ~ 6V, 5A / 0 ~ ±25V, 1A	Zdroj napětí
NOYES OLS1 (850 / 1300 nm) - ST	Zdroj optického záření
NOYES OPM4 (850 / 1300 / 1310 / 1550 nm) - ST	Měřič optického výkonu
Mikrokom - LM - 1 (850 nm) - FC	Měřič optického výkonu
Ocean optic USB 4000	USB spektrometr
ESCORT - 3136A	Multimetr
METEX - M3800	Multimetr
Agilen - 33220A	Funkční generátor
TEXTRONIX - TDS2014B	Dvoukanálový osciloskop

10. MĚŘENÍ PARAMETRŮ LASEROVÝCH DIOD A FOTODIOD SYSTÉMŮ TDM A WDM

Před vlastním měřením sestavených přenosových systémů TDM a WDM, bylo nutné charakterizovat a ověřit hodnoty katalogových parametrů jednotlivých optoelektronických komponent použitých v těchto systémech.

V první části tohoto měření bylo cílem zjistit tvar závislosti výstupního optického výkonu na měněném pracovním proudu laserových diod použitých v datovém a napájecím kanálu (tzv. L - I charakteristiky). Z těchto charakteristik dále byly určovány další parametry jako hodnota pracovního proudu, hodnota prahového proudu a účinnost měřené laserové diody (označovaných LD).

V druhé části tohoto měření byly proměřovány závislosti dopadajícího optického výkonu na proudu fotodiodami použitých v datovém a napájecím kanálu (tzv. průběhy citlivostí fotodiod), ze kterých byly zjištěny hodnoty parametru citlivosti měřených fotodiod (označovaných FD).

10.1 POSTUP MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI VÝSTUPNÍHO OPTICKÉHO VÝKONU NA PRACOVNÍM PROUDU LASEROVÝCH DIOD

Měření jednotlivých bodů závislosti výstupního optického výkonu na pracovním proudu probíhalo podle níže popsaného postupu.

Měřená laserová dioda byla přes rezistor připojena k napájecímu zdroji Agilent - E3631A, který umožňoval jemně nastavovat hodnoty napájecího napětí U_N a současně i měřit odběr pracovního proudu I_P . Pro přesnější nastavování (měření) pracovního proudu byl v napájecí větvi použit multimetr METEX - 3800.

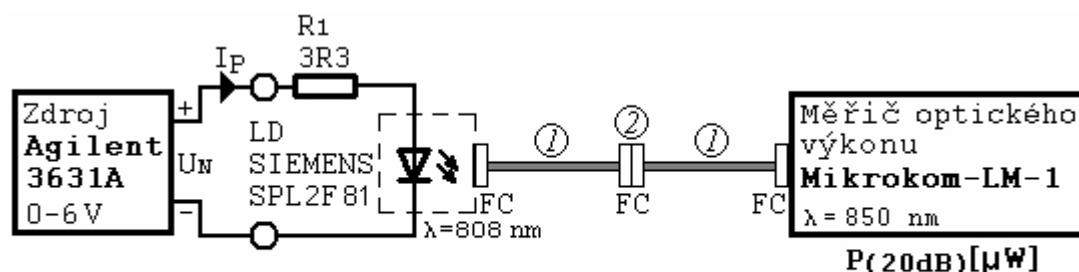
Dále byla měřená laserová dioda propojena pomocí MM optického vlákna s příslušným měřicem optického výkonu, kde byly měřeny hodnoty výstupního optického výkonu optického záření P_O . Protože nebyly k dispozici téměř žádné redukce mezi různými typy optických konektorů, tak použití vhodného měřiče optického výkonu záleželo na typu připojení optického konektoru laserové diody. Měřič optického výkonu NOYES OPM4 měl připojení pro ST konektor, byl tedy

vhodný pro měření LD PL13B002ST83-S-0 datového kanálu. Měřič optického výkonu Mikrokom - LM - 1 měl připojení pro FC konektor, byl tedy vhodný pro měření LD SIEMENS SPL 2F81 napájecího kanálu.

Výsledkem měření byla charakteristika závislosti výstupního optického výkonu P_O na pracovním proudu I_P měřené laserové diody.

10.2 MĚŘENÍ NA LASEROVÉ DIODĚ SIEMENS SPL 2F81

Toto měření se týkalo ověření katalogových hodnot parametrů výkonové laserové diody SIEMENS SPL 2F81 (viz tabulka 9.3) použité pro napájecí kanál přenosového systému TDM a WDM. Podle typu připojení optického konektorů LD SIEMENS SPL 2F81 a katalogové hodnoty P_O se odvíjela sestava optické části schémat pro měření výstupního optického výkonu popsaného v kapitole 10.1. Schéma zapojení měření je zobrazeno na obrázku 10.1.



1 - Optická vlákna MM GI 62,5/125 μm (FC-FC)

2 - Optický útlumový článek 20 dB

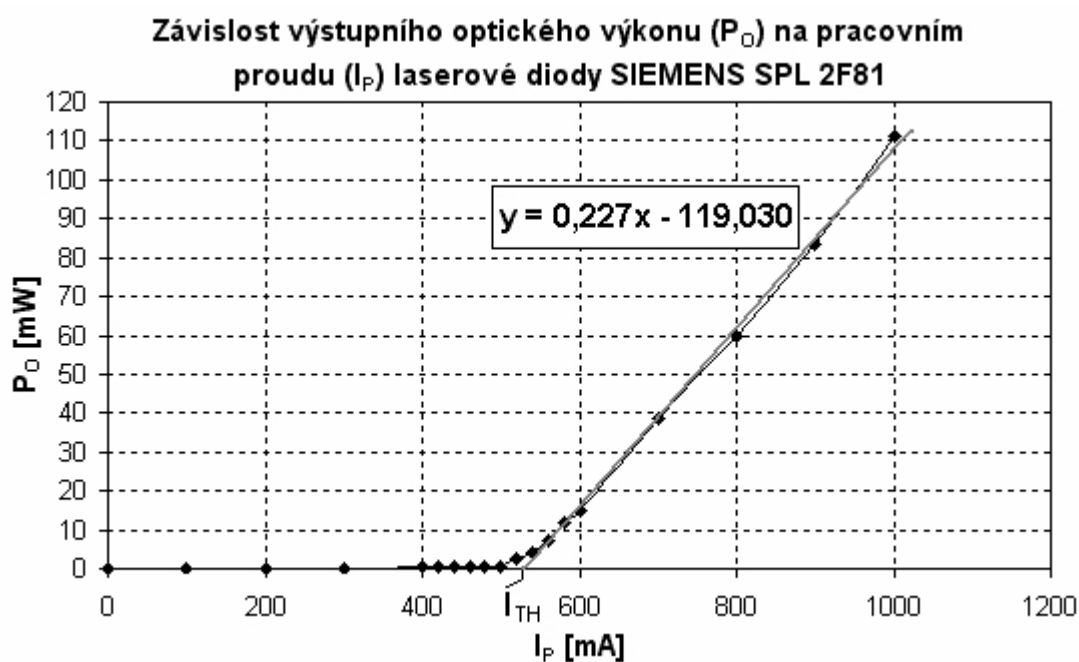
Obrázek 10.1: Schéma měření optického výkonu LD SIEMENS SPL 2F81

Laserová dioda SIEMENS SPL 2F81 měla max. katalogovou hodnotu optického výkonu P_O rovnou 800 mW, která několikanásobně převyšovala max. možnou měřicí hodnotu měřiče optického výkonu Mikrokom - LM - 1 (měřil max. do 2 mW). Aby bylo možné proměřit většinu hodnot pracovních proudů (I_P) ve větším rozsahu, musel být v optické trase zařazen útlumový článek 20 dB, který zajistil 100násobný útlum optického výkonu světelného záření laserové diody. Tímto mohl být na laserové diodě nastavován výstupní optický výkon až do 200 mW a na

měřič optického výkonu přibližně dopadalo světelné záření o optickém výkonu ($P_{O(20dB)}$) okolo 2 mW, které stále bylo detekovatelné. Skutečný výstupní optický výkon (P_O) světelného záření laserové diody byl následně vypočítán pomocí vztahu:

$$P_O = P_{O(20dB)} \cdot 100 \quad [W, W]. \quad (10.1)$$

Naměřené hodnoty výstupního optického výkonu světelného záření laserové diody SIEMENS SPL 2F81 jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 1 a zobrazeny v závislosti $P_O = f(I_P)$ na obrázku 10.2.



Obrázek 10.2: Závislost $P_O = f(I_P)$ laserové diody SIEMENS SPL 2F81

10.2.1 Stanovení prahového, pracovního proudu a účinnosti laserové diody

Pro stanovení hodnoty prahového proudu (I_{TH}) byla použita metoda lineární extrapolace, kdy se závislost $P_O = f(I_P)$ v určitém intervalu proudů nad prahem proložila přímkou, jejíž průsečík s proudovou osou udával hodnotu prahového proudu (viz obrázek 10.2).

Hodnotu pracovního proudu (I_P) laserové diody bylo možné odečíst ze závislosti $P_O = f(I_P)$ při maximálním optickém výkonu světelného záření udávaným výrobcem a nastaveným na laserové diodě.

Hodnotu účinnosti (η) laserové diody bylo možné určit ze směrnice proložené přímkou závislosti $P_O = f(I_P)$ (viz obrázek 10.2) nebo pomocí výpočtu z hodnot krajních bodů lineární části této charakteristiky.

Tabulka 10.2: Porovnání zjištěných hodnot parametrů s katalogovými hodnotami výrobce laserové diody SIEMENS SPL 2F81

Měřený parametr	Symbol	Odečtené hodnoty z naměřené funkce $P_O = f(I_P)$	Katalogové hodnoty výrobce			Jednotka
			Min.	Typ.	Max.	
Prahový proud	I_{TH}	530	400	450	550	[mA]
Pracovní proud	I_P	-	1300	1500	1800	[mA]
Diferenciální účinnost	η	0,227	0,600	0,700	0,850	[W / A]

10.2.2 Zhodnocení měření

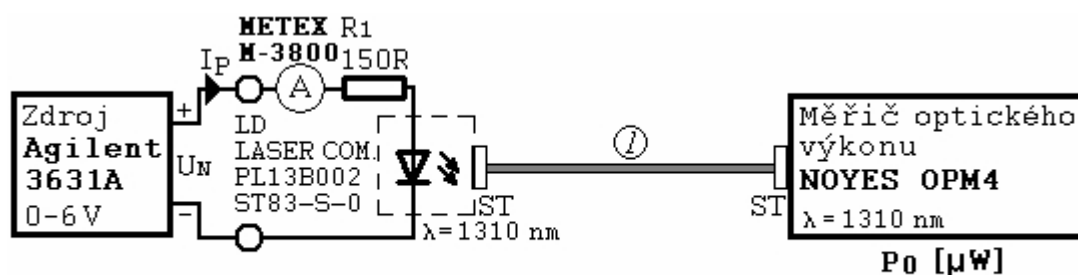
Hodnota prahového proudu laserové diody SIEMENS SPL 2F81 odečteného ze závislosti $P_O = f(I_P)$ na obrázku 10.2 spadá do intervalu katalogových hodnot udávaných výrobcem (viz tabulka 10.2).

Hodnotu pracovního proudu laserové diody při max. optickém výkonu nebylo možné měřením ověřit, protože závislost $P_O = f(I_P)$ na obrázku 10.2 byla měřena max. do hodnoty 1000 mA. Při vyšších hodnotách pracovního proudu docházelo k rapidnímu zahřívání laserové diody a bez dostatečného chlazení by mohlo dojít k jejímu zničení.

Odečtená hodnota účinnosti je výrazně nižší než udávaná min. katalogová hodnota (viz tabulka 10.2). Chyba při tomto měření mohla vzniknout mnoha faktory, ze kterých asi nejvýznamnější je to, že měřič optického výkonu Mikroskop - LM1 byl kalibrován na vyšší vlnové délky (okolo 850 nm) než emitované (měřené) světelné záření laserové diody SIEMENS SPL 2F81 (808 nm). Přesnější měřicí přístroj (pro měření světelného záření o vlnové délce 800 nm) s odpovídajícím typem připojení optického konektoru nebyl k dispozici.

10.3 MĚŘENÍ NA LASEROVÉ DIODĚ PL13B002ST83-S-0

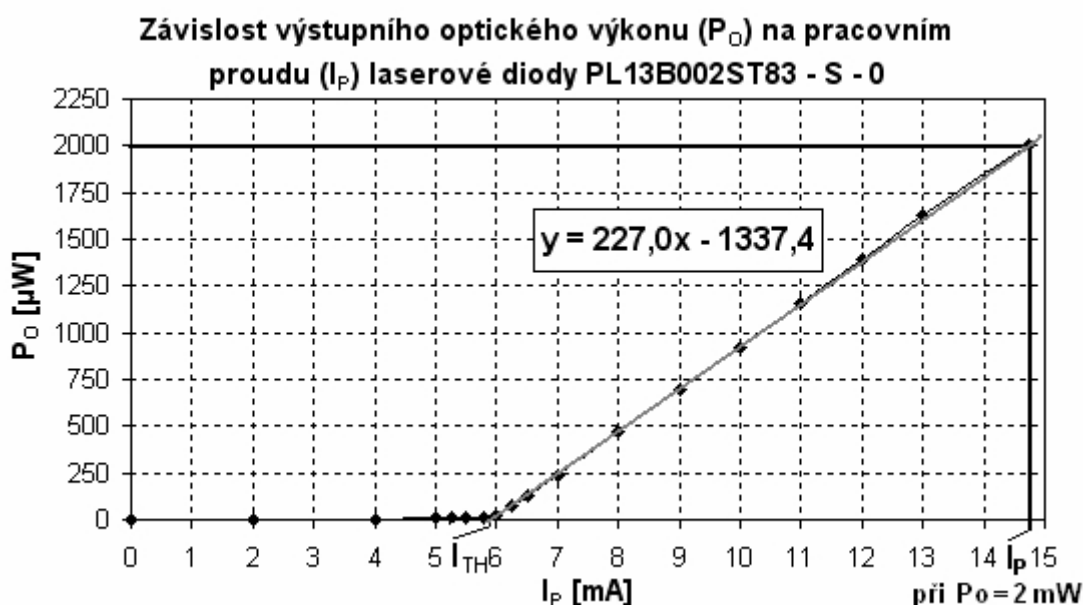
Toto měření se týkalo ověření katalogových hodnot parametrů laserové diody LASER COMPONENTS PL13B002ST83-S-0 (viz tabulka 9.4) použité pro datový kanál přenosového systému TDM a WDM. Měření probíhalo přesně podle popsaného postupu v kapitole 10.1. Schéma měření je zobrazeno na obrázku 10.3.



1 - Optické vlákno MM 62,5/125 μm (ST-ST)

Obrázek 10.3: Schéma měření optického výkonu LD PL13B002ST83-S-0

Naměřené hodnoty výstupního optického výkonu světelného záření laserové diody PL13B002ST83-S-0 jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 2 a zobrazeny v závislosti $P_O = f(I_P)$ na obrázku 10.4.



Obrázek 10.4: Závislost $P_O = f(I_P)$ laserové diody PL13B002ST83-S-0

Stanovení jednotlivých hodnot prahového proudu (I_{TH}), pracovního proudu (I_P) a účinnosti (η) laserové diody PL13B002ST83-S-0 ze závislosti $P_O = f(I_P)$ probíhalo obdobně, jak je popsáno v kapitole 10.2.1.

Tabulka 10.3: Porovnání zjištěných hodnot parametrů s katalogovými hodnotami výrobce laserové diody PL13B002ST83-S-0

Měřený parametr	Symbol	Odečtené hodnoty z naměřené funkce $P_O = f(I_P)$	Katalogové hodnoty výrobce			Jednotka
			Min.	Typ.	Max.	
Prahový proud	I_{TH}	5,8	3,0	5,0	15,0	[mA]
Pracovní proud	I_P	14,7	10,0	20,0	35,0	[mA]
Diferenciální účinnost	η	0,227	0,200	0,300	0,500	[W / A]

10.3.1 Zhodnocení měření

Hodnoty prahového proudu, pracovního proudu a účinnosti laserové diody PL13B002ST83-S-0 zjištěné ze závislosti $P_O = f(I_P)$ na obrázku 10.4 spadají do rozsahů uváděných katalogových hodnot výrobcem (viz tabulka 10.3). Výrobce také provedl kontrolní měření pracovního proudu na této laserové diodě při stejných podmínkách a došel k hodnotám: 14,6 mA a 14,4 mA, což potvrzuje odečtenou hodnotu 14,7 mA.

Měřením byly specifikovány a ověřeny hlavní parametry laserové diody PL13B002ST83-S-0, která byla použita jako zdroj datového kanálu TDM a WDM.

10.4 POSTUP MĚŘENÍ CITLIVOSTI FOTODIOD

Měření citlivosti neboli směrnice závislosti dopadajícího optického výkonu na proudu fotodiodami probíhalo dvoustupňově podle níže popsaného postupu.

V první části měření bylo nutné změřit hodnoty optického výkonu světelného záření P_O dopadajícího na měřenou fotodiodu. To probíhalo obdobně, jak je popsáno v kapitole 10.1, kdy byla měřená laserová dioda propojena pomocí MM optického vlákna s měřičem optického výkonu a proměřovala se její závislost výstupního optického výkonu P_O na pracovním proudu I_P .

V druhé části měření byla laserová dioda propojena pomocí MM optického vlákna s měřenou fotodiodou. Nastavování pracovního proudu laserovou diodou probíhalo úplně stejně jako v předešlé části měření. Akorát místo měřiče optického výkonu zapojeného na konci optické trasy zde byla připojena fotodioda s paralelně řazeným rezistorem.

Při každém měření se potom odečítala změna napětí U_R na paralelně řazeném rezistoru R fotodiody pomocí multimetru ESCORT - 3136A a následně se vypočítal proud I_R rezistorem (fotodiodou) pomocí vztahu:

$$I_R = \frac{U_R}{R} \quad [A, V, \Omega]. \quad (10.2)$$

Výsledkem měření byla charakteristika závislosti dopadajícího optického výkonu P_O na proudu I_R měřenou fotodiodou..

10.5 MĚŘENÍ NA FOTODIODĚ TESLA 3 WN 166 20

Toto měření se týkalo ověření katalogových hodnot parametru citlivosti (viz tabulka 9.5) pěti fotodiod označovaných FD1 - FD5 typu TESLA 3 WN 166 20, které bylo možno použít pro napájecí kanál přenosového systému TDM a WDM. Jako zdroj světelného záření zde byla použita laserová dioda SIEMENS SPL 2F81.

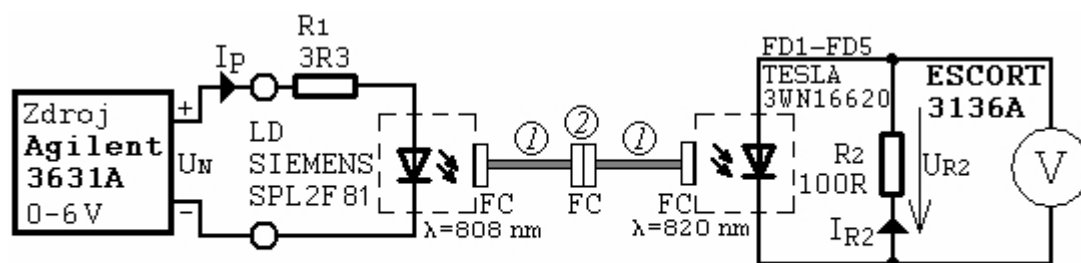
V první části byl měřen optický výkon světelného záření dopadající na fotodiodu (výstupní výkon světelného záření laserové diody SIEMENS SPL 2F81) úplně stejně jako v kapitole 10.2, pro stejnou optickou trasu s 20 dB útlumovým článkem a stejné schéma měření zobrazené na obrázku 10.1.

U fotodiod se projevuje omezení výstupního napětí PN přechodu na hodnotu okolo 0,5 ~ 0,6 V, která je dána materiálem a konstrukcí fotodiody. Aby měřené závislosti dopadajícího optického výkonu na proudu fotodiodami nebyly touto hodnotou nijak zkreslovány, tak byla pokusným měřením zjištěna hodnota 0,5 V na fotodiodě, při které ještě nedocházelo ke zkreslení (omezení) charakteristiky průběhu citlivosti. Z tohoto důvodu byl v druhé části měření v optické trase použit útlumový článek 10 dB, proto musel být změřený 100násobně utlumený optický výkon světelného záření z první části přepočítán pomocí vztahu:

$$P_{O(10\text{ dB})} = P_{O(20\text{ dB})} \cdot 10 \quad [W, W].$$

Naměřené a vypočtené hodnoty optického výkonu světelného záření $P_{O(20\text{ dB})}$ a $P_{O(10\text{ dB})}$ dopadajícího na fotodiodu TESLA 3 WN 166 20 jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 3 a zobrazeny v závislostech $I_{R2} = f(P_{O(10\text{ dB})})$ na obrázku 10.6 a v příloze 2 na obrázku 1, 2, 3, 4.

Druhá část měření potom už probíhala úplně stejně jak je popsáno v kapitole 10.4. Schéma zapojení měření je zobrazeno na obrázku 10.5.

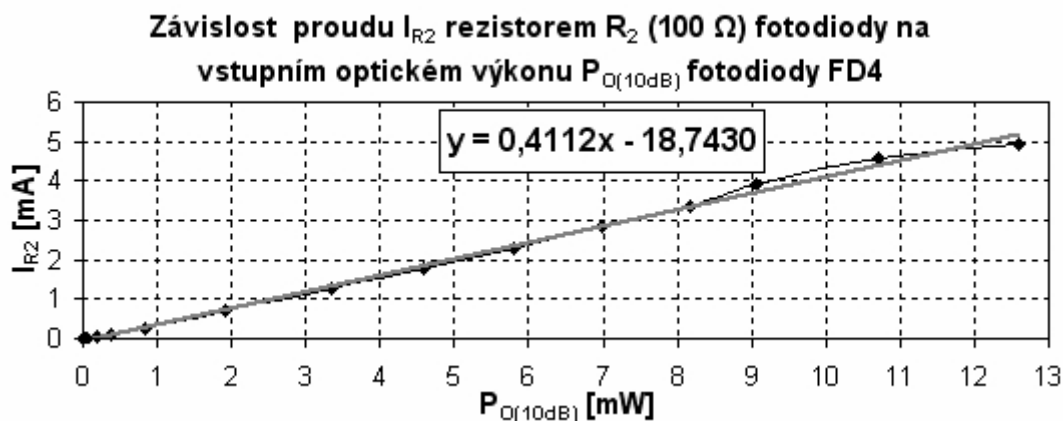


1 - Optická vlákna MM GI 62,5/125 μm (FC-FC)

2 - Optický útlumový článek 10 dB

Obrázek 10.5: Schéma měření na rezistoru R_2 fotodiody TESLA 3WN16620

Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorama R_2 fotodiód jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 4 a zobrazeny v závislostech $I_{R2} = f(P_{O(10\text{ dB})})$ na obrázku 10.6 a v příloze 2 na obrázku 1, 2, 3, 4.



Obrázek 10.6: Závislost $I_{R2} = f(P_{O(10\text{ dB})})$ pro FD4 TESLA 3 WN 166 20

10.5.1 Stanovení hodnot parametru citlivostí fotodiod

Hodnoty citlivostí (S) fotodiod FD1 - FD5 typu TESLA 3 WN 166 20 byly zjištěny ze směrnic proložených přímkami naměřených závislostí $I_{R2} = f(P_{O(10dB)})$ (viz obrázek 10.6 a příloha) nebo pomocí výpočtu z hodnot krajních bodů lineárních částí těchto charakteristik.

Tabulka 10.4: Porovnání zjištěných hodnot parametru citlivostí s katalogovými hodnotami výrobce fotodiod TESLA 3 WN 166 20

Měřený parametr		Symbol	Odečtené hodnoty ze směrnice $I_{R2} = f(P_{O(10dB)})$	Katalogové hodnoty výrobce			Jednotka
				Min.	Typ.	Max.	
Citlivost	FD1	S	0,3692	0,4	0,47	0,5	[A / W]
	FD2		0,4024				
	FD3		0,4022				
	FD4		0,4112				
	FD5		0,4106				

10.5.2 Zhodnocení měření

Jako nejvhodnější fotodiody pro napájecí kanál systému WDM a TDM mohou být zvoleny FD2, FD3, FD4 nebo FD5 typu TESLA 3 WN 166 20, jejichž hodnoty citlivostí se pohybují v rozmezí katalogových hodnot udávaným výrobcem. V dalších měřeních byla vždy použita fotodiody FD4 s hodnotou citlivosti 0,4112 A / W.

10.6 MĚŘENÍ NA FOTODIODĚ PDINP075ST83-W-0

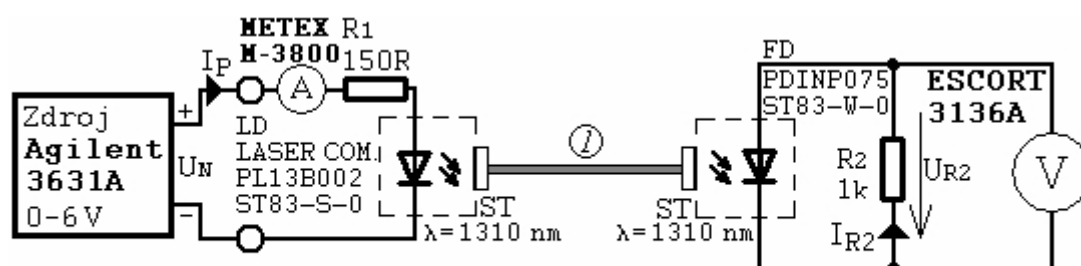
Toto měření se týkalo ověření katalogových hodnot parametru citlivosti (viz tabulka 9.6) fotodiody LASER COMPONENTS PDINP075ST83-W-0 použité pro datový kanál přenosového systému TDM a WDM. Jako zdroj světelného záření zde byla použita laserová dioda LASER COMPONENTS PL13B002ST83-S-0.

V první části byl měřen optický výkon světelného záření dopadající na fotodiodu (výstupní výkon světelného záření laserové diody PL13B002ST83-S-0)

úplně stejně jako v kapitole 10.3, pro stejnou optickou trasu a stejné schéma měření zobrazené na obrázku 10.3.

Naměřené a vypočtené hodnoty optického výkonu světelného záření P_O dopadajícího na fotodiodu PDINP075ST83-W-0 jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 5 a zobrazeny v závislosti $I_{R2} = f(P_O)$ na obrázku 10.8.

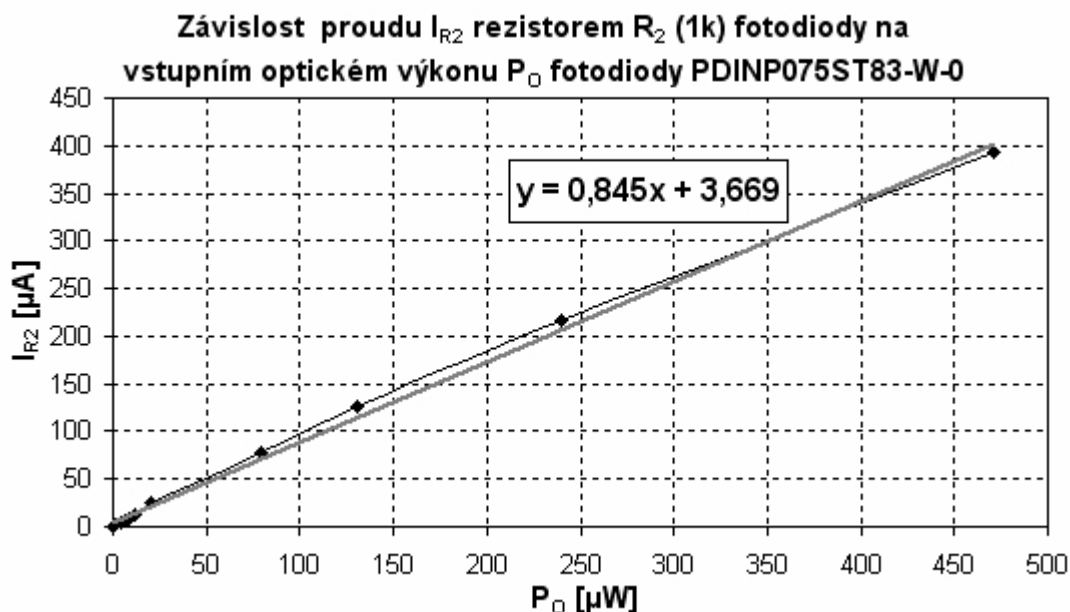
Druhá část měření potom už probíhala úplně stejně jak je popsáno v kapitole 10.4. Schéma zapojení měření je zobrazeno na obrázku 10.7.



1 - Optické vlákno MM 62,5/125 μm (ST-ST)

Obrázek 10.7: Schéma měření na rezistoru R_2 fotodiody PDINP075ST83-W-0

Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorem R_2 fotodiody jsou uvedeny v příloze 1 (tabulka 6) a zobrazeny v závislosti $I_{R2} = f(P_O)$ na obrázku 10.8.



Obrázek 10.8: Závislost $I_{R2} = f(P_O)$ pro FD PDINP075ST83-W-0

10.6.1 Stanovení hodnot parametru citlivosti fotodiody

Hodnota citlivosti fotodiody PDINP075ST83-W-0 byla zjištěna ze směrnice proložené přímkou naměřené závislosti $I_{R2} = f(P_O)$ na obrázku 10.8 nebo pomocí výpočtu z hodnot krajních bodů této charakteristiky.

Tabulka 10.5: Porovnání zjištěné hodnoty parametru citlivosti s katalogovými hodnotami výrobce fotodiody PDINP075ST83-W-0

Měřený parametr		Symbol	Odečtené hodnoty ze směrnice $I_{R2} = f(P_{O(10\text{ dB})})$	Katalogové hodnoty výrobce			Jednotka
				Min.	Typ.	Max.	
Citlivost	FD	S	0,845	0,800	0,900	-	[A / W]

10.6.2 Zhodnocení měření

Měřením byla ověřena katalogová hodnota citlivosti fotodiody LASER COMPONENTS PDINP075ST83-W-0, která byla použita pro datový kanál systému TDM a WDM.

11. MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH SLUČOVAČŮ/ROZBOČOVAČŮ A MUX/DMUX

Před vlastním měřením sestavených přenosových systémů TDM a WDM, bylo nutné charakterizovat a ověřit hodnoty katalogových parametrů jednotlivých pasivních optických komponent použitých v těchto systémech.

V první části tohoto měření bylo cílem ověřit výrobcem udávaný parametr vložených ztrát (optický útlum) jednotlivých tras (včetně izolace těchto tras) optických slučovačů / rozbočovačů použitých v systému TDM pro vlnové délky 850 nm a 1300 nm.

V další části tohoto měření byl opět proměřován optický útlum jednotlivých kanálů (včetně izolace těchto kanálů) optických multiplexerů / demultiplexerů použitých v systému WDM pro vlnové délky 850 nm a 1300 nm.

Obě tyto části byly měřeny pomocí metody vložených ztrát se třemi a s jedním měřicím spojovacím modulem. Pro měření byla použita měřicí souprava skládající se ze zdroje optického záření NOYES OLS1 (850 / 1310 nm), měřiče optického výkonu NOYES OPM4 (850 / 1300 / 1310 / 1550 nm).

11.1 METODA VLOŽENÝCH ZTRÁT

Měření útlumu jednotlivých tras optických slučovačů / rozbočovačů a kanálů MUX / DMUX probíhalo dvoustupňově.

V prvním kroku se změřila hodnota referenčního vstupního optického výkonu P_{O1} přímým propojením zdroje optického záření NOYES OLS1 s měřičem optického výkonu NOYES OPM4 pomocí měřicích spojovacích modulů. Tři měřicí spojovací moduly byly použity pro měření optických slučovačů / rozbočovačů a jeden měřicí spojovací modul byl použit pro měření optických MUX / DMUX.[12]

V druhém kroku se zapojila měřená trasa optického slučovače / rozbočovače nebo měřený kanál MUX / DMUX mezi zdroj optického záření a měřič optického výkonu (jeden měřicí spojovací modul byl nahrazen touto trasou / kanálem). Tímto se změřila hodnota výstupního optického výkonu P_{O2} pro měřenou trasu / kanál.[12]

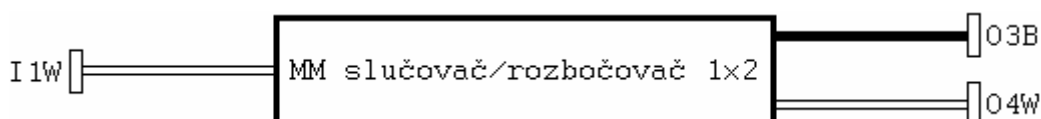
Následně byl vypočítán optický útlum pro měřenou trasu / kanál těchto optických komponent pomocí vztahu [12]:

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_{o1}}{P_{o2}} \quad [dB, W, W]. \quad (11.1)$$

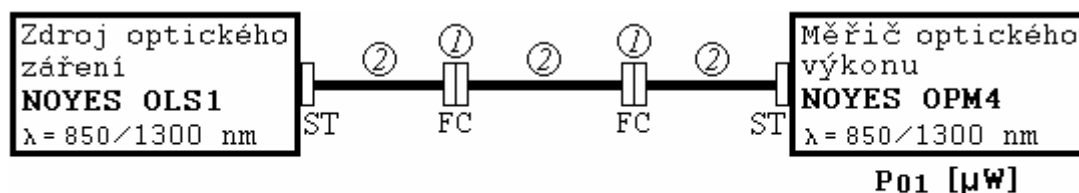
11.2 MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH SLUČOVAČŮ / ROZBOČOVAČŮ THORLABS FCMM625-90A-FC

Teoretický popis optických slučovačů / rozbočovačů byl uveden v kapitole 5.1.1. Pro připomenutí je možné optické slučovače použít jak pro sloučení, tak i rozdělení optického signálu.

Katalogové hodnoty obou optických slučovačů FCMM625-90A-FC jsou uvedeny v tabulce 9.7. Podle typu konektorů (FC) optického slučovače / rozbočovače se odvíjela sestava optické části schémat pro měření útlumu pomocí metody vložených ztrát popsané v kapitole 11.1. Poměr rozdělení optického výkonu byl 90 % pro trasu I1W → O4W a 10 % pro trasu I1W → O3B, což by se mělo projevit při měření útlumu těchto tras. Velký vliv na použití těchto optických slučovačů / rozbočovačů v TDM má vzájemný útlum signálů mezi trasami O3B ↔ O4W (tzv. izolace tras), který má vliv na velikost přeslechů mezi těmito trasami.

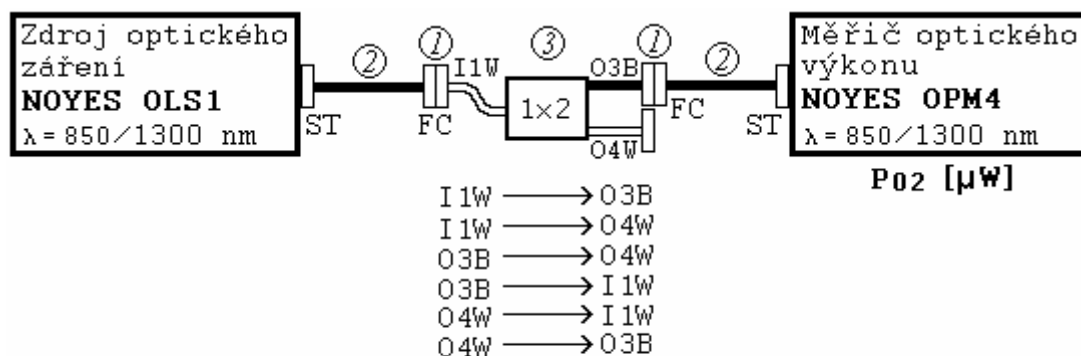


Obrázek 11.1: Popis pouzdra a vývodů FCMM625-90A-FC



1 - Optický spojovací články pro spojení FC konektorů
2 - Měřicí spojovací moduly

Obrázek 11.2: Schéma měření vstupního optického výkonu P_{01}
slučovače / rozbočovače



- 1 - Optický spojovací články pro spojení FC konektorů
2 - Měřicí spojovací moduly
3 - Měřená trasa optického slučovače / rozbočovače

Obrázek 11.3: Schéma měření výstupního optického výkonu P_{02} slučovače / rozbočovače

Tabulka 11.1: Porovnání naměřených hodnot útlumu jednotlivých tras optického slučovače / rozbočovače (2752990) s hodnotami výrobce

Měřená trasa	Optický slučovač / rozbočovač (ve schématech označován (1)) THORLABS FCMM625-90A-FC; SR: 10/90; S/N: 2752990				
2 směry měření při $t = 25^\circ\text{C}$	Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu pro $\lambda = 850\text{ nm}$			Naměřené a katalogové hodnoty útlumu výrobce pro $\lambda = 850\text{ nm}$	
	$P_{O1(850)} [\mu\text{W}]$	$P_{O2(850)} [\mu\text{W}]$	$A_{(850)} [\text{dB}]$	$A_{M(850)} [\text{dB}]$	$A_{K(850)} [\text{dB}]$
I1W → O3B	0,5468	0,0685	9,021	9,000	12,000
I1W → O4W		0,4172	1,175	1,200	1,500
O3B → O4W		0,0016	25,337	-	-
O3B → I1W		0,0687	9,009	9,000	12,000
O4W → I1W		0,4151	1,197	1,200	1,200
O4W → O3B		0,0016	25,337	-	-
2 směry měření při $t = 25^\circ\text{C}$	Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu pro $\lambda = 1300\text{ nm}$			Naměřené a katalogové hodnoty útlumu výrobce pro $\lambda = 1300\text{ nm}$	
	$P_{O1(1300)} [\mu\text{W}]$	$P_{O2(1300)} [\mu\text{W}]$	$A_{(1300)} [\text{dB}]$	$A_{M(1300)} [\text{dB}]$	$A_{K(1300)} [\text{dB}]$
I1W → O3B	0,5758	0,0783	8,665	-	-
I1W → O4W		0,4434	1,135	-	-
O3B → O4W		0,0015	25,842	-	-
O3B → I1W		0,0786	8,648	-	-
O4W → I1W		0,4465	1,105	-	-
O4W → O3B		0,0014	26,141	-	-

Tabulka 11.2: Porovnání naměřených hodnot útlumu jednotlivých tras optického slučovače / rozbočovače (2752918) s hodnotami výrobce

Měřená trasa	Optický slučovač / rozbočovač (ve schématech označován (2)) THORLABS FCMM625-90A-FC; SR: 10/90; S/N: 2752918				
2 směry měření při $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu pro $\lambda = 850\text{ nm}$			Naměřené a katalogové hodnoty útlumu výrobce pro $\lambda = 850\text{ nm}$	
	$P_{O1(850)} [\mu\text{W}]$	$P_{O2(850)} [\mu\text{W}]$	$A_{(850)} [\text{dB}]$	$A_{M(850)} [\text{dB}]$	$A_{K(850)} [\text{dB}]$
I1W \rightarrow O3B	0,5368	0,0491	10,387	10,990	12,000
I1W \rightarrow O4W		0,4191	1,075	0,880	1,500
O3B \rightarrow O4W		0,0013	26,159	-	-
O3B \rightarrow I1W		0,0493	10,370	10,990	12,000
O4W \rightarrow I1W		0,4198	1,068	0,880	1,200
O4W \rightarrow O3B		0,0013	26,159	-	-
2 směry měření při $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu pro $\lambda = 1300\text{ nm}$			Naměřené a katalogové hodnoty útlumu výrobce pro $\lambda = 1300\text{ nm}$	
	$P_{O1(1300)} [\mu\text{W}]$	$P_{O2(1300)} [\mu\text{W}]$	$A_{(1300)} [\text{dB}]$	$A_{M(1300)} [\text{dB}]$	$A_{K(1300)} [\text{dB}]$
I1W \rightarrow O3B	0,5758	0,0641	9,534	-	-
I1W \rightarrow O4W		0,4391	1,177	-	-
O3B \rightarrow O4W		0,0012	26,811	-	-
O3B \rightarrow I1W		0,0628	9,623	-	-
O4W \rightarrow I1W		0,4458	1,111	-	-
O4W \rightarrow O3B		0,0011	27,189	-	-

11.2.1 Zhodnocení měření

Jak vyplývá z tabulek 11.1 a 11.2, tak měření byly ověřeny hodnoty parametrů vložených ztrát (optického útlumu) jednotlivých tras dvojice optických slučovačů / rozbočovačů FCMM625-90A-FC (S/N: 2752990 a 2752918). Zjištěné hodnoty se lišily od hodnot naměřených výrobcem max. o 0,6 dB, což mohlo být způsobeno chybou měření, volbou měřicí metody, přesností měřících přístrojů nebo vazebními ztrátami v optické trase. Každopádně změřené hodnoty vložených ztrát byly menší než uváděné max. katalogové hodnoty výrobce.

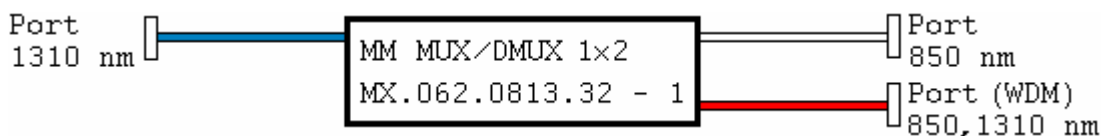
Obecně se dá říci, že čím větší je izolace tras O3B \leftrightarrow O4W, tak dochází k většímu útlumu přeslechů signálů mezi těmito trasami. Měřená izolace tras O3B \leftrightarrow O4W se pohybovala v rozmezí 25 až 27 dB, což by zajistilo přibližně 300 až

500násobný útlum přeslechů mezi těmito trasami. Výrobce bohužel tento parametr neměřil, ani neuvedl v katalogových hodnotách, takže nebylo s čím porovnávat.

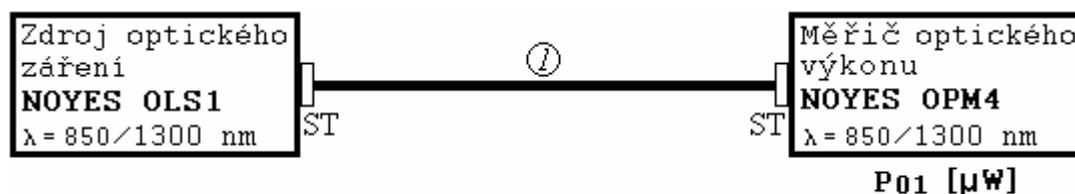
11.3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH MUX / DMUX LASER COMPONENTS MX.062.0813.32-1

Teoretický popis optických multiplexerů / demultiplexerů včetně provedení byl uveden v kapitole 6.1. Pro připomenutí jsou optické multiplexery základním pasivním optickým prvkem WDM přenosového systému a je možné optické multiplexery použít jak pro multiplexaci, tak i demultiplexaci optických signálů různých vlnových délek do / z jednoho optického vlákna.

Katalogové hodnoty obou optických multiplexerů MX.062.0813.32-1 jsou uvedeny v tabulce 9.7. Podle typu konektorů (ST) optického multiplexeru / demultiplexeru se odvíjela sestava optické části schémat pro měření útlumu pomocí metody vložených ztrát popsané v kapitole 11.1.

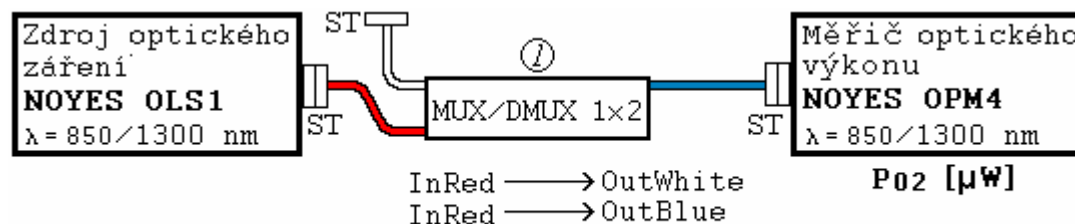


Obrázek 11.4: Popis pouzdra a vývodů MX.062.0813.32-1



1 - Měřicí spojovací modul

Obrázek 11.5: Schéma měření vstupního opt. výkonu P_{01} MUX / DMUX



1 - Měřená trasa optického multiplexeru / demultiplexeru

Obrázek 11.6: Schéma měření výstupního opt. výkonu P_{02} MUX / DMUX

**Tabulka 11.3: Porovnání naměřených hodnot útlumu jednotlivých kanálů
optických MUX / DMUX (S/N: 358) s hodnotami výrobce**

Měřený kanál	Optický multiplexer / demultiplexer (ve schématech označován (1)) MX.062.0813.32-1; S/N: 358				
1 směr měření při t = 25 °C	Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu pro $\lambda = 850$ nm			Naměřené a katalogové hodnoty útlumu výrobce pro $\lambda = 850$ nm	
	$P_{O1(850)}$ [μW]	$P_{O2(850)}$ [μW]	$A_{(850)}$ [dB]	$A_{M(850)}$ [dB] (bez konektoru)	$A_{K(850)}$ [dB]
InRed (WDM 850) → OutWhite (850)	14,590	11,830	0,911	0,5	< 1,2
InRed (WDM 850) → OutBlue (1300)		0,014	30,305	-	> 28,0
1 směry měření při t = 25 °C	Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu pro $\lambda = 1300$ nm			Naměřené a katalogové hodnoty útlumu výrobce pro $\lambda = 1300$ nm	
	$P_{O1(1300)}$ [μW]	$P_{O2(1300)}$ [μW]	$A_{(1300)}$ [dB]	$A_{M(1300)}$ [dB] (bez konektoru)	$A_{K(1300)}$ [dB]
InRed (WDM 1300) → OutBlue (1300)	15,580	11,220	1,426	0,2	< 0,8
InRed (WDM 1300) → OutWhite (850)		0,013	30,687	-	> 28,0

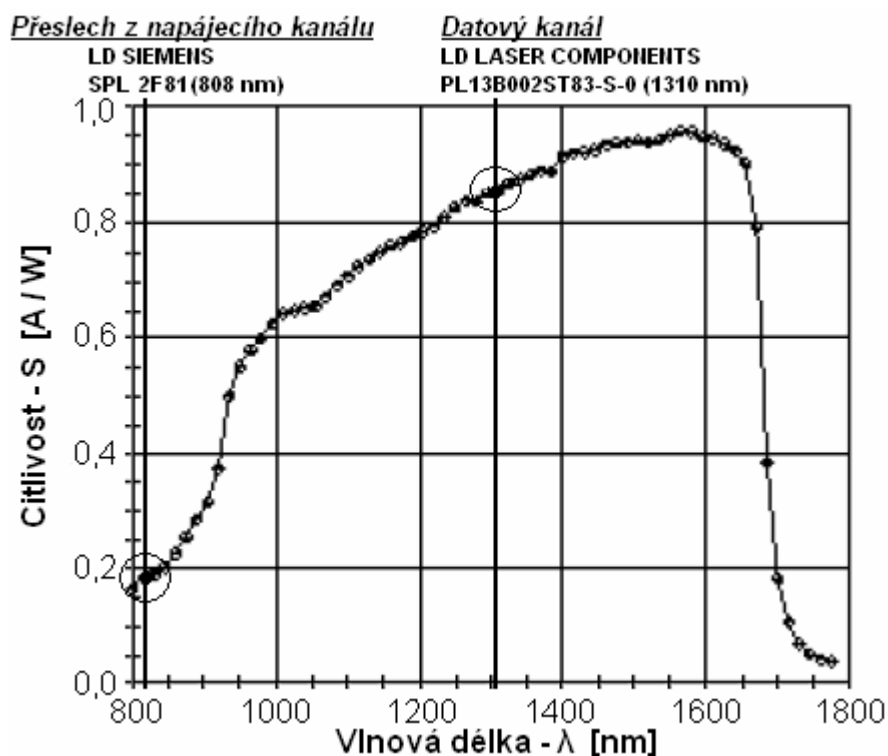
**Tabulka 11.4: Porovnání naměřených hodnot útlumu jednotlivých kanálů
optických MUX / DMUX (S/N: 359) s hodnotami výrobce**

Měřený kanál	Optický multiplexer / demultiplexer (ve schématech označován (2)) MX.062.0813.32-1; S/N: 359; ve schématech označován (2)				
1 směr měření při t = 25 °C	Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu pro $\lambda = 850$ nm			Naměřené a katalogové hodnoty útlumu výrobce pro $\lambda = 850$ nm	
	$P_{O1(850)}$ [μW]	$P_{O2(850)}$ [μW]	$A_{(850)}$ [dB]	$A_{M(850)}$ [dB] (bez konektoru)	$A_{K(850)}$ [dB]
InRed (WDM 850) → OutWhite (850)	14,590	14,140	0,136	0,2	< 1,2
InRed (WDM 850) → OutBlue (1300)		0,016	29,599	-	> 28,0
1 směr měření při t = 25 °C	Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu pro $\lambda = 1300$ nm			Naměřené a katalogové hodnoty útlumu výrobce pro $\lambda = 1300$ nm	
	$P_{O1(1300)}$ [μW]	$P_{O2(1300)}$ [μW]	$A_{(1300)}$ [dB]	$A_{M(1300)}$ [dB] (bez konektoru)	$A_{K(1300)}$ [dB]
InRed (WDM 1300) → OutBlue (1300)	15,580	11,480	1,326	0,1	< 0,8
InRed (WDM 1300) → OutWhite (850)		0,024	28,124	-	> 28,0

11.3.1 Zhodnocení měření

Jak vyplývá z tabulek 11.3 a 11.4, tak měřením byly pouze ověřeny hodnoty parametrů vložených ztrát (optického útlumu) pro kanál 850 nm obou optických multiplexerů / demultiplexerů MX.062.0813.32-1 (S/N: 358 a 359). Pro 1300 nm kanál byly změřené hodnoty vložených ztrát až o 0,6 dB vyšší oproti uváděným max. katalogovým hodnotám výrobce, což mohlo být způsobeno chybou měření, volbou měřicí metody, přesností měřících přístrojů nebo vazebními ztrátami v optické trase (ve spojení opt. konektorů). S naměřenými hodnotami výrobce nelze porovnávat, protože měřil bez optických konektorů, na kterých by také docházelo k útlumu.

Vzájemná měřená izolace kanálů se pohybovala v rozmezí 28 až 30 dB, což by odpovídalo uváděné katalogové hodnotě výrobce 28 dB. Kdyby přeci jen došlo k přeslechu optického signálu z jednoho kanálu do druhého, tak by to nemělo mít velký vliv na přenášený signál v druhém kanálu, protože každý ze dvojice detektorů optického záření obou kanálů má různé spektrální charakteristiky citlivosti pro příslušné vlnové délky zdrojů obou kanálů (viz př. na obrázku 11.7 - pro vlnovou délku napájecího kanálu má datová fotodioda 4násobně nižší citlivost).



Obrázek 11.7: Spektrální charakteristika fotodiody PDINP075ST83-Z-0 [19]

12. MĚŘENÍ NA SYSTÉMECH TDM A WDM

Dle pokynů zadání bakalářské práce byly postupně sestaveny dvoukanálové obousměrné přenosové systémy TDM a WDM, na kterých byly měřeny parametry útlumu napájecího a datového kanálu, možné přeslechy mezi kanály, účinnost přeneseného elektrického výkonu napájecím kanálem a rychlost přenosu po napájecím a datovém kanálu.

12.1 MĚŘENÍ ÚTLUMU NAPÁJECÍHO A DATOVÉHO KANÁLU

Měření útlumu kanálů přenosového systému TDM a WDM bylo prováděno pomocí metody vložených ztrát, která byla popsána v kapitole 11.1. Opět bylo potřeba změřit vstupní optický výkon P_{O1} a potom výstupní optický výkon P_{O2} měřeného optického kanálu, ze kterých byl potom vypočítán útlum měřeného kanálu pomocí vztahu:

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_{O1}}{P_{O2}} \quad [dB, W, W]. \quad (12.1)$$

12.1.1 Měření útlumu napájecího a datového kanálu systému TDM

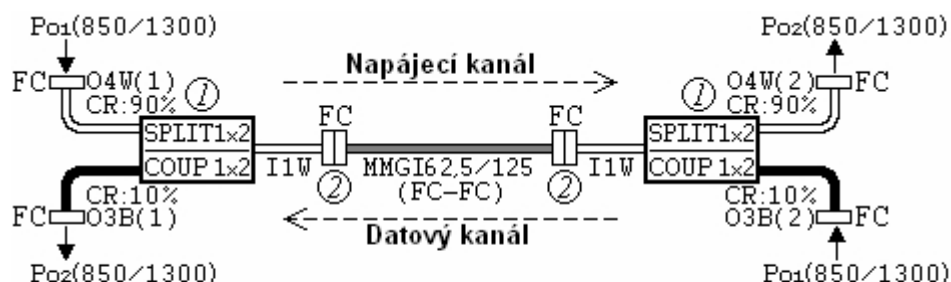
Měření útlumu napájecího a datového kanálu sestaveného systému TDM bylo prováděno ve směrech šíření jednotlivých kanálů (obousměrně) včetně přeslechů na výstup sousedního kanálů.

Základem optické trasy systému TDM bylo MM optické vlákno, s předem změřeným útlumem (viz tabulka 12.1), po němž se přenos signálů uskutečňoval. Na obou koncích vlákna byly připojeny optické slučovače / rozbočovače FCMM625-90A-FC, jejichž parametry byly měřeny v kapitole 11.2.

Tabulka 12.1: Naměřena hodnota optického útlumu přenosového vlákna TDM

Typ optického vlákna	Měřený útlum pro $\lambda = 850 \text{ nm}$			Měřený útlum pro $\lambda = 1300 \text{ nm}$		
	$P_{1(850)}$ [μW]	$P_{2(850)}$ [μW]	$A_{(850)}$ [dB]	$P_{1(1300)}$ [μW]	$P_{2(1300)}$ [μW]	$A_{(1300)}$ [dB]
MM GI 62,5/125 μm (FC - FC)	0,6087	0,5434	0,493	0,8747	0,7780	0,509

Měřený systém TDM s vyznačenými směry měření útlumu je zobrazen na obrázku 12.1. Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu jednotlivých kanálů jsou uvedeny v tabulce 12.2.



1 - Optický slučovače / rozbočovače THORLABS FCMM625-90A-FC
2 - Optický spojovací články pro spojení FC konektorů

Obrázek 12.1: Schéma měření útlumu kanálů systému TDM

Tabulka 12.2: Naměřené hodnoty optického útlumu jednotlivých kanálů
a přeslechů přenosového systému TDM

Měřená trasa při $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$		Měřený útlum pro $\lambda = 850\text{ nm}$			Měřený útlum pro $\lambda = 1300\text{ nm}$		
Popis	Směr měření	$P_{O1(850)}$ [μW]	$P_{O2(850)}$ [μW]	$A_{(850)}$ [dB]	$P_{O1(1300)}$ [μW]	$P_{O2(1300)}$ [μW]	$A_{(1300)}$ [dB]
Napájecí kanál	O4W(1) → O4W(2)	0,4342	0,2187	2,978	0,4772	0,2169	3,424
Přeslech na výstup datového kanálu	O4W(1) → O3B(1)		0,0204	13,281		0,0195	13,887
Datový kanál	O3B(2) → O3B(1)		0,0114	15,808		0,0101	16,744
Přeslech na výstup napájecího kanálu	O3B(2) → O4W(2)		0,0019	23,589		0,0010	26,787

12.1.2 Měření útlumu napájecího a datového kanálu systému WDM

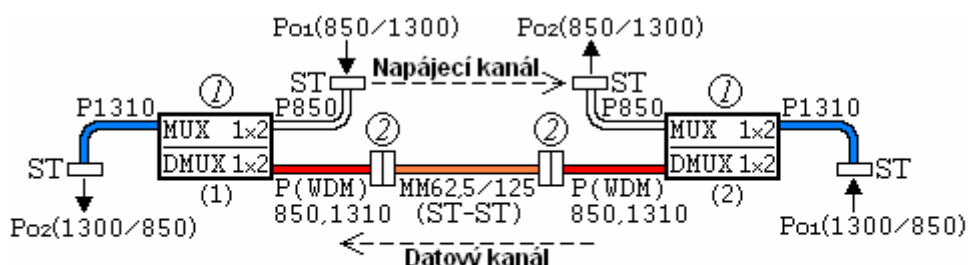
Měření útlumu kanálů sestaveného systému WDM bylo prováděno ve směrech jednotlivých kanálů na příslušných vlnových délkách.

Základem optické trasy systému WDM bylo MM optické vlákno, s předem změřeným útlumem (viz tabulka 12.3), po němž se přenos WDM signálu uskutečňoval. Na obou koncích vlákna byly připojeny optické multiplexery / demultiplexery MX.062.0813.32-1, jejichž parametry byly měřeny v kapitole 11.3.

Tabulka 12.3: Naměřena hodnota optického útlumu přenosového vlákna WDM

Typ optického vlákna	Měřený útlum pro $\lambda = 850$ nm			Měřený útlum pro $\lambda = 1300$ nm		
	$P_{1(850)}$ [μ W]	$P_{2(850)}$ [μ W]	$A_{(850)}$ [dB]	$P_{1(1300)}$ [μ W]	$P_{2(1300)}$ [μ W]	$A_{(1300)}$ [dB]
MM 62,5/125 μ m (ST - ST)	0,7132	0,6234	0,584	0,7496	0,6348	0,722

Měřený systém WDM s vyznačenými směry měření útlumu je zobrazen na obrázku 12.2. Naměřené a vypočtené hodnoty útlumu jednotlivých kanálů jsou uvedeny v tabulce 12.4.



- 1 - Optický multiplexery / demultiplexery MX.062.0813.32 - 1 MM 850/1300 nm
2 - Optický spojovací články pro spojení ST konektorů

Obrázek 12.2: Schéma měření útlumu kanálů systému WDM

Tabulka 12.4: Naměřené hodnoty optického útlumu jednotlivých kanálů přenosového systému WDM

Měřená trasa při $t = 25$ °C		Měřený útlum pro $\lambda = 850$ nm			Měřený útlum pro $\lambda = 1300$ nm		
Popis	Směr měření	$P_{O1(850)}$ [μ W]	$P_{O2(850)}$ [μ W]	$A_{(850)}$ [dB]	$P_{O1(1300)}$ [μ W]	$P_{O2(1300)}$ [μ W]	$A_{(1300)}$ [dB]
Napájecí kanál	P850(1) → P850(2)	14,0100	7,819	2,533	14,2900	0,0079	32,574
Datový kanál	P1300(2) → 1300(1)		0,0094	31,733		7,4150	2,849

12.1.3 Zhodnocení měření

Hodnoty měřeného útlumu jednotlivých kanálů TDM a WDM více i méně korespondovaly se sečtenými změřenými hodnotami parametrů dvojic optických slučovačů / rozbočovačů a útlumu přenosového vlákna TDM. A s parametry optických MUX / DMUX a útlumu přenosového vlákna WDM.

12.2 PROMĚŘOVÁNÍ NAPÁJECÍHO A DATOVÉHO KANÁLU SYSTÉMU TDM A WDM

Proměřování kanálů systémů TDM a WDM (včetně přeslechů) probíhalo podle následujícího postupu.

Laserové diody obou kanálů systému byly přes rezistory připojeny na obě větve napájecího zdroje Agilent - E3631A, který umožňoval jemně nastavovat hodnoty napájecích napětí U_{N1} (napájecí kanál), U_{N3} (datový kanál) a současně i měřit odběr pracovního proudu I_{P1} (napájecí kanál), I_{P3} (datový kanál). Pro přesnější nastavování pracovního proudu byl v datové větvi použit multimetr METEX - 3800.

Na koncích obou kanálů systémů TDM a WDM byly zapojeny fotodiody s paralelně řazeným rezistorem. Při každém měření se odečítaly změny napětí U_{R2} a U_{R4} na paralelně řazených rezistorech R_2 a R_4 fotodiod pomocí multimetru ESCORT - 3136A a následně se vypočítaly proudy rezistorama (fotodiodama) I_{R2} a I_{R4} pomocí vztahu 10.2. Konkrétní měření TDM a WDM probíhalo ve třech krocích.

1. KROK MĚŘENÍ

V prvním kroku byla LD PL13B002ST83-S-0 datového kanálu vypnutá (I_{P3} nastaven na 0 mA). Proměřována byla charakteristika $I_{R2} = f(I_{P1})$ napájecího kanálu s LD SIEMENS SPL 2F81 (I_{P1} nastavován v rozmezí 0 ~ 700 mA) a charakteristika $I_{R4} = f(I_{P1})$ přeslechu z napájecího do datového kanálu.

2. KROK MĚŘENÍ

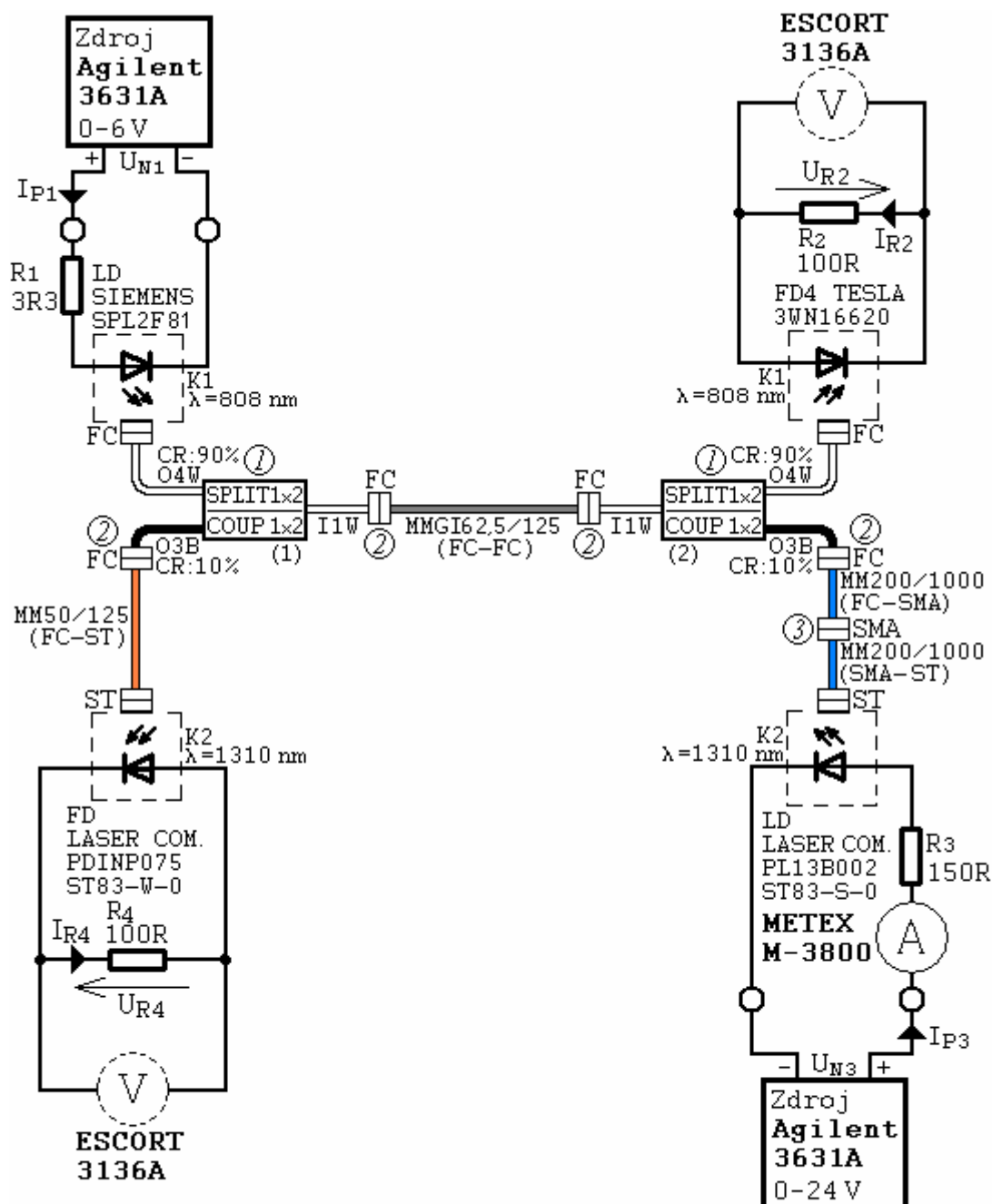
Ve druhém kroku byla LD SIEMENS SPL 2F81 napájecího kanálu vypnutá (I_{P1} nastaven na 0 mA). Proměřována byla charakteristika $I_{R4} = f(I_{P3})$ datového kanálu s LD PL13B002ST83-S-0 (I_{P3} nastavován v rozmezí 0 ~ 15 mA) a charakteristika $I_{R2} = f(I_{P3})$ přeslechu z datového do napájecího kanálu.

3. KROK MĚŘENÍ

Ve třetím kroku byla LD PL13B002ST83-S-0 datového kanálu zapnutá (I_{P3} nastaven na 14,74 mA ~ $P_{O(VSTUP)} = 2$ mW). Proměřována byla charakteristika $I_{R2} = f(I_{P1})$ napájecího kanálu s LD SIEMENS SPL 2F81 (I_{P1} nastavován v rozmezí 0 ~ 700 mA) a dále byl měřen vliv napájecího kanálu na průběh datového kanálu $I_{R4} = f(I_{P1})$.

12.2.1 Měření napájecího a datového kanálu systému TDM

Schéma měření charakteristik systému TDM je zobrazeno na obrázku 12.3.

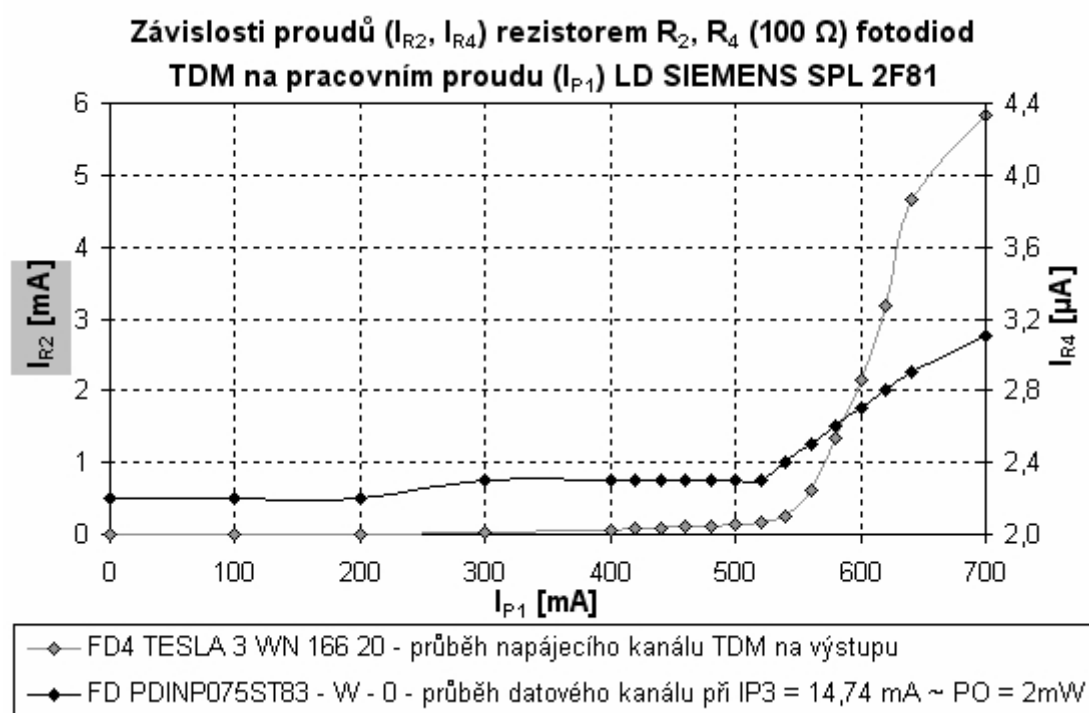


- 1 - Optický slučovače / rozbočovače THORLABS FCMM625-90A-FC
- 2 - Optický spojovací články pro spojení FC konektorů
- 3 - Optický spojovací článek pro spojení SMA konektorů

Obrázek 12.3: Schéma měření systému TDM pro krok měření 1, 2 a 3

Laserová dioda PL13B002ST83-S-0 a fotodioda PDINP075ST83-W-0 měly typ připojení pro ST optický konektor, tudíž nešly přímo napojit na datový kanál TDM, který měl typ připojení pro FC optický konektor. Musely tedy být v rámci možností použity taková optická vlákna, aby z nich šlo sestavit příslušnou redukci optických konektorů ST → FC. Tím došlo ke zvýšení útlumu celé datové optické trasy. Měřením pomocí metody vložených ztrát, byl tento útlum přírodních optických vláken změřen a uveden v tabulce 12.5.

Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorama R_2 , R_4 fotodiód systému TDM jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 7, 8 a 9) pro kroky měření 1, 2 a 3 popsané v kapitole 12.2. Naměřené charakteristiky pro kroky měření 1, 2 a 3 jsou zobrazeny v příloze 2 - obrázek 5 a 6 a závislosti I_{R2} , $I_{R4} = f(I_{P1})$ na obrázku 12.4.

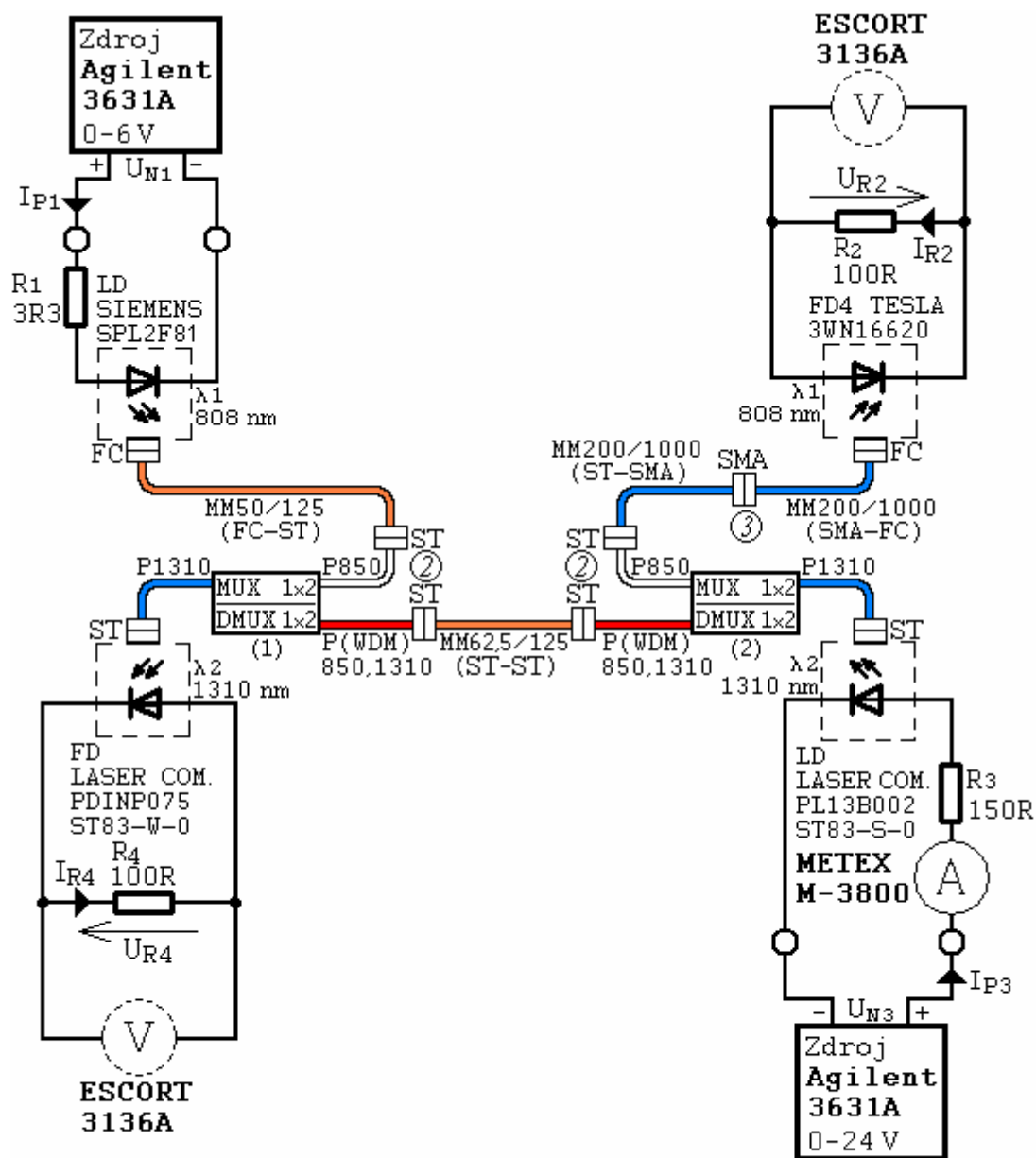


Obrázek 12.4: Závislost I_{R2} , $I_{R4} = f(I_{P1})$ pro třetí krok měření TDM

Jak je vidět z obrázku 12.4, tak přeslech z napájecího do datového kanálu se začíná výrazně projevovat od pracovního proudu 500 mA laserové diody SIEMENS SPL 2F81 systému TDM. Nárůst přeslechu do datového kanálu je max. o 0,8 μ A.

12.2.2 Měření napájecího a datového kanálu systému WDM

Schéma měření charakteristik systému WDM je zobrazeno na obrázku 12.5.

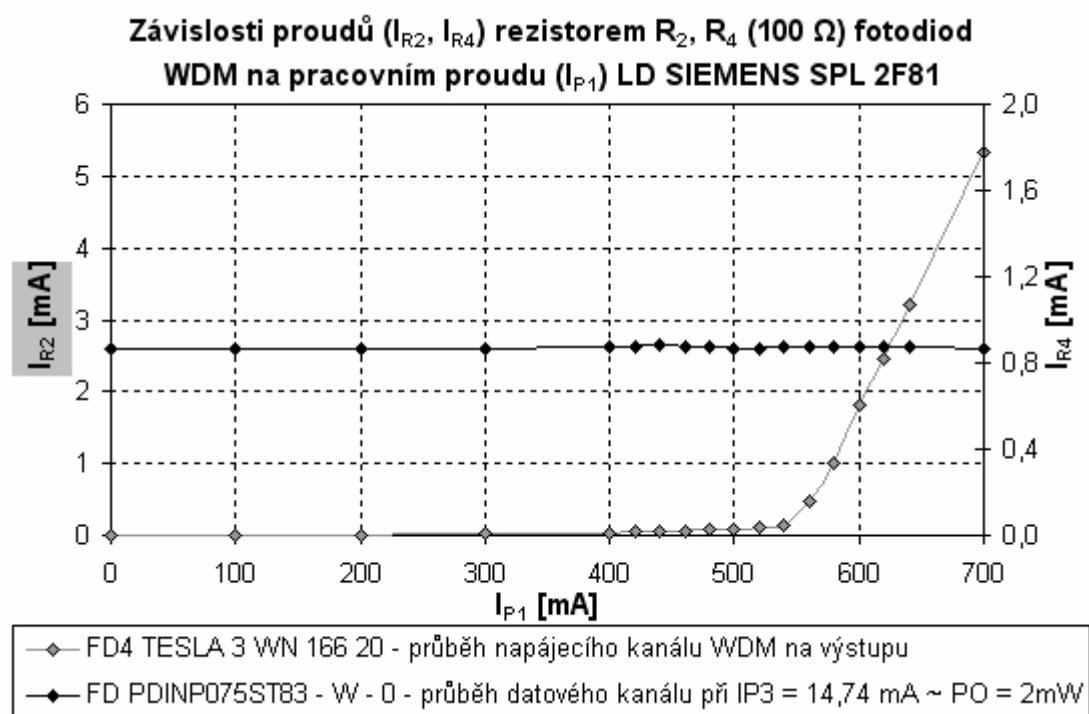


- 1 - Optický multiplexery / demultiplexery MX.062.0813.32 - 1 MM 850/1300 nm
2 - Optický spojovací články pro spojení ST konektorů
3 - Optický spojovací článek pro spojení SMA konektorů

Obrázek 12.5: Schéma měření systému WDM pro krok měření 1, 2 a 3

Laserová dioda SIEMENS SPL 2F81 a fotodioda TESLA 3 WN 16620 měly typ připojení pro FC optický konektor, tudíž opět nešly přímo napojit na napájecí kanál WDM, který měl typ připojení pro ST optický konektor. Musely tedy být použity sestavená optická vlákna s příslušnou redukcí optických konektorů FC → ST, která byla už použita k datovému kanálu systému TDM a jejichž útlum je uveden v tabulce 12.5.

Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorama R_2 , R_4 fotodiod systému WDM jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 10, 11 a 12 pro kroky měření 1, 2 a 3 popsané v kapitole 12.2. Naměřené charakteristiky pro kroky měření 1, 2 a 3 jsou zobrazeny v příloze 2 - obrázek 7 a 8 a závislosti I_{R2} , $I_{R4} = f(I_{P1})$ na obrázku 12.6.



Obrázek 12.6: Závislost I_{R2} , $I_{R4} = f(I_{P1})$ pro třetí krok měření WDM

Jak je vidět z obrázku 12.6, tak přeslech z napájecího do datového kanálu se neuplatňuje a nijak není ovlivněn průběh datového kanálu. Výstupní proud datového kanálu WDM má stálou hodnotu okolo 0,86 mA. Oproti TDM se WDM zdá být vhodnější přenosový systém, jak pro přenos datového, tak i napájecího signálu.

Tabulka 12.5: Naměřená hodnota optického útlumu přírodních optických vláken datového kanálu TDM a napájecího kanálu WDM

Typy přírodních (redukčních) optických vláken	$\lambda = 850 \text{ nm}$			$\lambda = 1300 \text{ nm}$		
	$P_{1(850)}$ [μW]	$P_{2(850)}$ [μW]	$A_{(850)}$ [dB]	$P_{1(1300)}$ [μW]	$P_{2(1300)}$ [μW]	$A_{(1300)}$ [dB]
MM 50/125 μm (ST - FC)	15,1010	5,5740	4,328	13,7100	4,3720	4,964
MM 200/1000 μm (FC - SMA)						
MM 200/1000 μm (SMA - ST)						

12.3 VÝPOČET PŘENESENÉHO ELEKTRICKÉHO VÝKONU NAPÁJECÍHO KANÁLU SYSTÉMU TDM A WDM

Výpočet účinnosti přeneseného elektrického výkonu z naměřených hodnot závislostí $I_{R2}, I_{R4} = f(I_{P1})$ na obrázcích 12.4 a 12.6 systému TDM a WDM probíhal dvoustupňově.

V prvním kroku se pro každou hodnotu nastavovaného pracovního proudu I_{P1} vypočítala hodnota dodávaného elektrického příkonu laserové diody SIEMENS SPL 2F81 pomocí vztahu:

$$P_1 = (U_{N1} - R_1 \cdot I_{P1}) \cdot I_{P1} \quad [W, V, \Omega, A]. \quad (12.2)$$

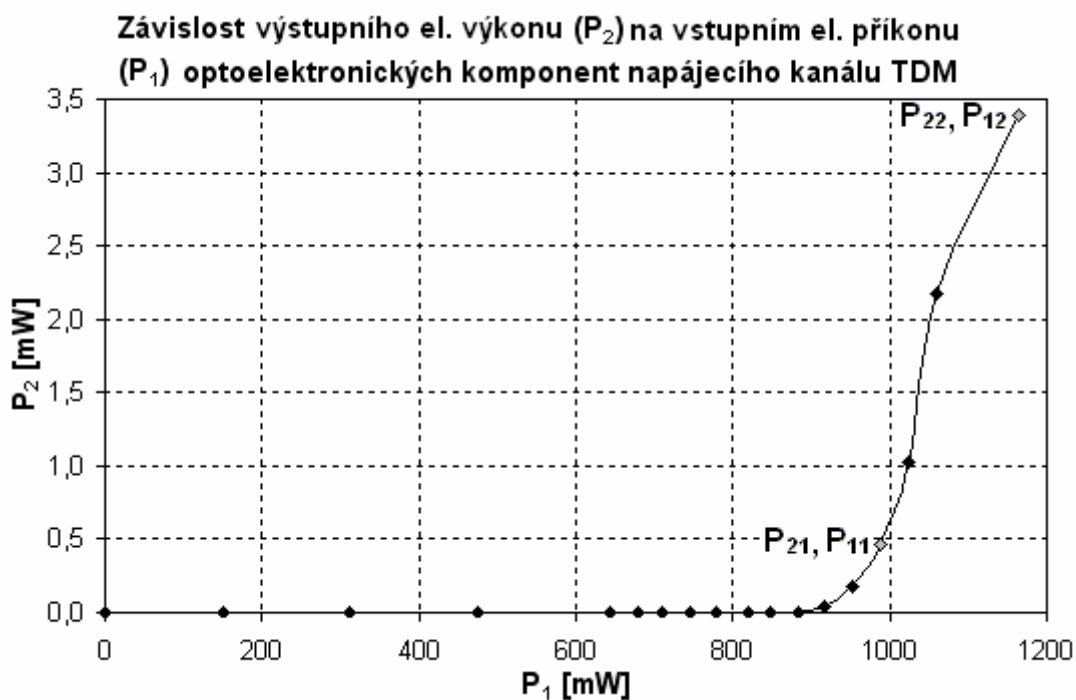
V druhém kroku se pro každou hodnotu proudu I_{R2} vypočítala hodnota výstupního elektrického výkonu na rezistoru R_2 fotodiody TESLA 3 WN 166 20 pomocí vztahu:

$$P_2 = U_{R2} \cdot I_{R2} \quad [W, V, A]. \quad (12.3)$$

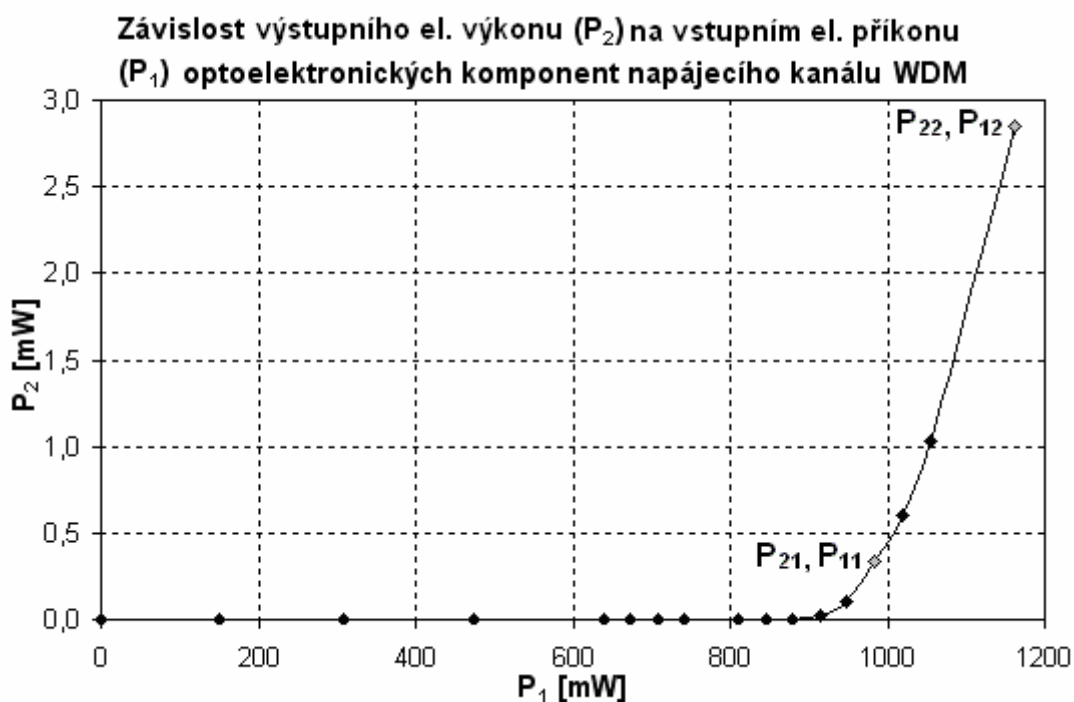
Vypočtené hodnoty P_1 a P_2 byly následně zobrazeny v závislostech $P_2 = f(P_1)$ na obrázcích 12.7 a 12.8 napájecího kanálu TDM a WDM, kdy z aktivní (lineární) oblasti této závislosti byly odečteny hodnoty P_{11}, P_{12} a P_{21}, P_{22} hraničních bodů pro výpočet účinnosti přeneseného elektrického výkonu pomocí vztahu:

$$\eta_e = \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \cdot 100 = \frac{P_{22} - P_{21}}{P_{12} - P_{11}} \cdot 100 \quad [\%, W, W]. \quad (12.1)$$

V této aktivní oblasti docházelo k rapidnímu nárůstu výstupního elektrického výkonu P_2 na rezistoru R_2 fotodiody TESLA 3 WN 166 20 při malém navýšení dodávaného elektrického příkonu P_1 laserové diody SIEMENS SPL 2F81.



Obrázek 12.7: Závislost $P_2 = f(P_1)$ pro napájecí kanál systému TDM



Obrázek 12.8: Závislost $P_2 = f(P_1)$ pro napájecí kanál systému WDM

Ze závislostí zobrazených na obrázcích 12.7 a 12.8 byly z vyznačených krajních bodů lineární části odečteny jejich hodnoty (P_{11} , P_{12} a P_{21} , P_{22}), které jsou vypsány v tabulce 12.6.

Tabulka 12.6: Odečtené hodnoty ze závislostí na obrázku 12.7 a 12.8

Charakteristika	P_{11} [mW]	P_{21} [mW]	P_{12} [mW]	P_{22} [mW]
Závislost $P_2 = f(P_1)$ pro napájecí kanál systému TDM na obrázku 12.7	987,600	0,465	1165,500	3,395
Závislost $P_2 = f(P_1)$ pro napájecí kanál systému WDM na obrázku 12.8	984,000	0,331	1161,300	2,836

Výpočet účinnosti přeneseného elektrického výkonu napájecího kanálu systému TDM a WDM pomocí vztahu 12.1:

$$\eta_{e(TDM)} = \frac{\Delta P_{2(TDM)}}{\Delta P_{1(TDM)}} \cdot 100 = \frac{P_{22(TDM)} - P_{21(TDM)}}{P_{12(TDM)} - P_{11(TDM)}} \cdot 100 = \frac{3,395 - 0,465}{1165,500 - 987,600} \cdot 100 = 1,647 \%,$$

$$\eta_{e(WDM)} = \frac{\Delta P_{2(WDM)}}{\Delta P_{1(WDM)}} \cdot 100 = \frac{P_{22(WDM)} - P_{21(WDM)}}{P_{12(WDM)} - P_{11(WDM)}} \cdot 100 = \frac{2,836 - 0,331}{1161,300 - 984,000} \cdot 100 = 1,412 \%.$$

12.3.1 Zhodnocení vypočtených hodnot

Jak je vidět z výsledků výše provedených výpočtů, tak systém TDM má o 0,235 % vyšší účinnost přeneseného elektrického výkonu oproti systému WDM.

Hlavní podíl na tomto rozdílu mohl být způsoben útlumem přívodních (redukčních) optických vláken optoelektronických komponent použitých v optické trase napájecího kanálu systému WDM. Útlumu vláken měl hodnotu 4,328 dB pro $\lambda = 850$ nm (viz tabulka 12.5), což způsobilo skoro 3násobný útlum napájecího signálu a ovlivnilo tak hodnoty proudů na výstupu napájecího kanálu potřebné pro výpočet výstupního elektrického výkonu P_2 . Optoelektronické komponenty napájecího kanálu systému TDM z důvodů konektorové kompatibility byly zapojeny přímo bez nutnosti těchto vláken.

Menší podíl na tomto rozdílu mohl být i způsoben útlumem napájecích kanálů změřených pro systém TDM (viz tabulka 12.2) a systém WDM (viz tabulka 12.4), který měl nestejnou hodnotu: 2,978 dB pro TDM a 2,533 dB pro WDM.

12.4 MĚŘENÍ RYCHLOSTI PŘENOSU SYSTÉMŮ TDM A WDM

Pro realizaci přenosových systémů TDM a WDM bylo použito stejných optoelektronických komponentů. Z teorie jednotlivých optických komponentů vyplývá, že rychlost přenášených signálů o určitých vlnových délkách se pohybuje v rozmezí 0 ~ 10 Mhz (20 MHz). Dá se tedy předpokládat, že měřená rychlost obou přenosových systémů bude stejná (podobná) a tak bylo provedeno jenom jedno měření na systému WDM.

12.4.1 Postup měření rychlosti přenosu systému TDM A WDM

Měření rychlosti přenosu systému TDM a WDM probíhalo podle následujícího postupu.

Laserová dioda měřeného kanálu byla buzena obdélníkovým signálem pomocí generátoru funkcí AGILENT 33220A. Amplituda A výstupu generátoru byla nastavena na takovou hodnotu (nastavován pracovní proud I_p laserové diody), aby buzení obdélníkovým signálem probíhalo v lineární části závislosti $I_p = f(P_o)$ neboli nad hodnotou prahového proudu laserové diody. V opačném případě mohlo dojít k rychlému a trvalému poškození struktury laserové diody, kde by rychlost destrukce hlavně záležela na hodnotě frekvence generovaného signálu.

Pomocí generátoru funkcí byla při buzení laserové diody postupně nastavována vyšší frekvence f budícího obdélníkového signálu a pomocí dvoukanalového osciloskopu TEKTRONIX TDS 2014B byly měřeny a pozorovány na laserové diodě a fotodiodě průběhy budícího a přeneseného signálu měřeným kanálem systému.

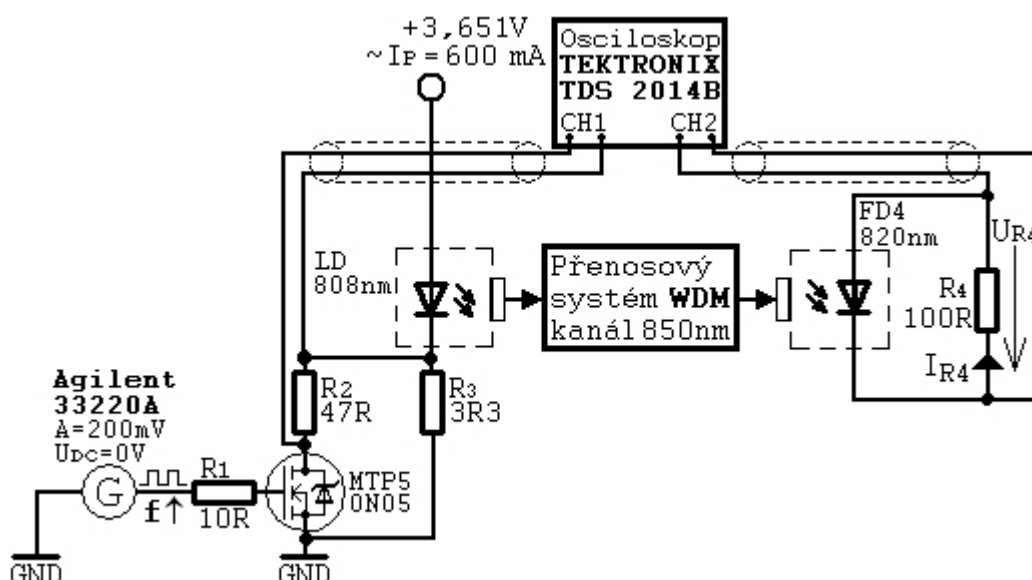
Byla hledána frekvence f_m , při které ještě nedocházelo k nerozpoznatelnému zkreslení přeneseného signálu. Tato frekvence potom určovala možnou (měřenou) rychlost přenosového systému.

12.4.2 Měření rychlosti napájecího kanálu WDM

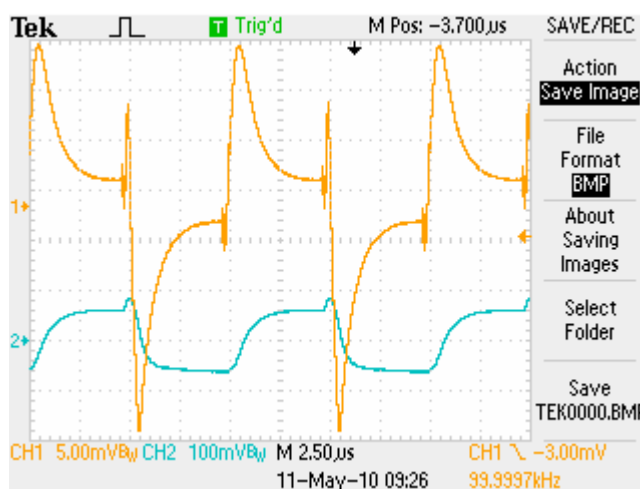
Laserovou diodu SIEMENS SPL 2F81 (označenou LD 808 nm) napájecího kanálu nebylo možné z důvodu vysoké hodnoty nastavovaného pracovního proudu

přímo budit pomocí funkčního generátoru Agilent 33220A. Proto byla laserová dioda se sériově řazeným rezistorem R_3 přímo připojena na napájecí zdroj Agilent 3631A, na kterém byla nastavená předem zvolená hodnota pracovního proudu I_P . V budícím obvodu byl použit tranzistor MOSFET (Motorola MTP0N05) ve spínacím režimu, který paralelně připojoval a odpojoval rezistor R_2 k rezistoru laserové diody R_3 . Tím byl měněn pracovní proud laserové diody při každé změně budícího signálu.

Schéma měření rychlosti napájecího kanálu je zobrazeno na obrázku 12.9. Změřené tvary budícího a přeneseného signálu jsou zobrazeny na obrázku 12.10.



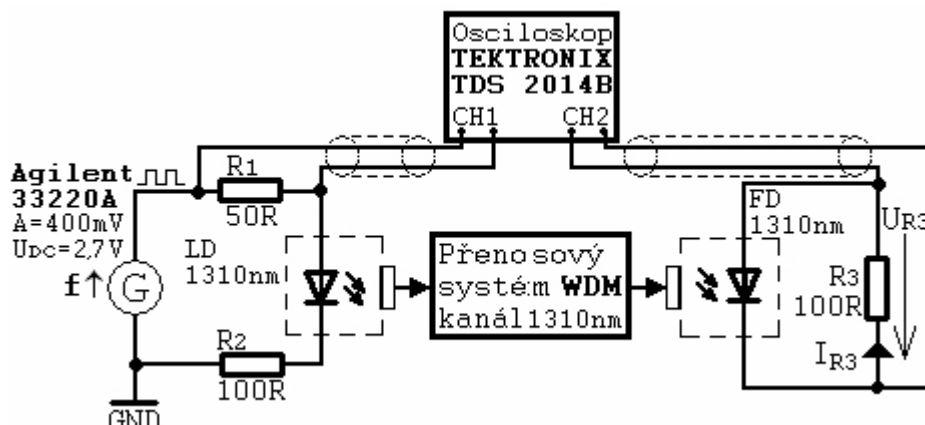
Obrázek 12.9: Schéma měření rychlosti přenosu napájecího kanálu WDM



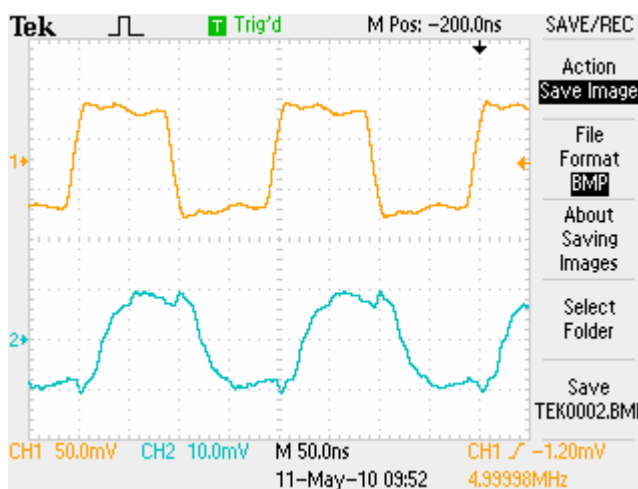
Obrázek 12.10: Změřené tvary budícího (CH1) a přeneseného (CH2) signálu

12.4.3 Měření rychlosti datového kanálu WDM

Měření rychlosti datového kanálu WDM probíhalo podle postupu popsáno v kapitole 12.4.1. Schéma měření rychlosti datového kanálu je zobrazeno na obrázku 12.11. Změřené tvary obou signálů jsou zobrazeny na obrázku 12.12.



Obrázek 12.11: Schéma měření rychlosti přenosu datového kanálu WDM



Obrázek 12.12: Změřené tvary budícího (CH1) a přeneseného (CH2) signálu

12.4.4 Zhodnocení měření

Tvary charakteristik budícího a přeneseného signálu pro napájecí a datový kanál na obrázcích 12.10 a 12.12 jsou zkresleny vlivem indukčnosti přívodních vodičů k jednotlivým komponentům a vlivem kapacity kabelů osciloskopu. Je zřejmé, že napájecí kanál bude daleko pomalejší ($f_{m(n)} = 100 \text{ KHz}$) oproti datovému kanálu, kde zkreslení signálu při $f_{m(d)} = 5 \text{ MHz}$ bylo stále akceptovatelné.

13. MĚŘENÍ NA LD S INTEGROVANOU FD PIN

V první části této kapitoly byl zjišťován vliv vnějšího světelného záření, dopadajícího na laserovou diodu U-LD-650543A s integrovanou fotodiodou PIN. Cílem bylo detekovat změnu hodnoty proudu procházejícího integrovanou fotodiodou PIN a jejím paralelně zapojeným rezistorem. Vnější světelné záření emitovaly diody LED, které byly postupně nasměrovány na laserovou diodu.

V druhé části této kapitoly byla měřením zjišťována závislost spektrální charakteristiky integrované fotodiody PIN laserové diody U-LD-650543A.

Katalogové hodnoty laserové diody U-LD-650543A a světelných LED diod (LED1 - LED7) jsou uvedeny v tabulkách 9.1 a 9.2.

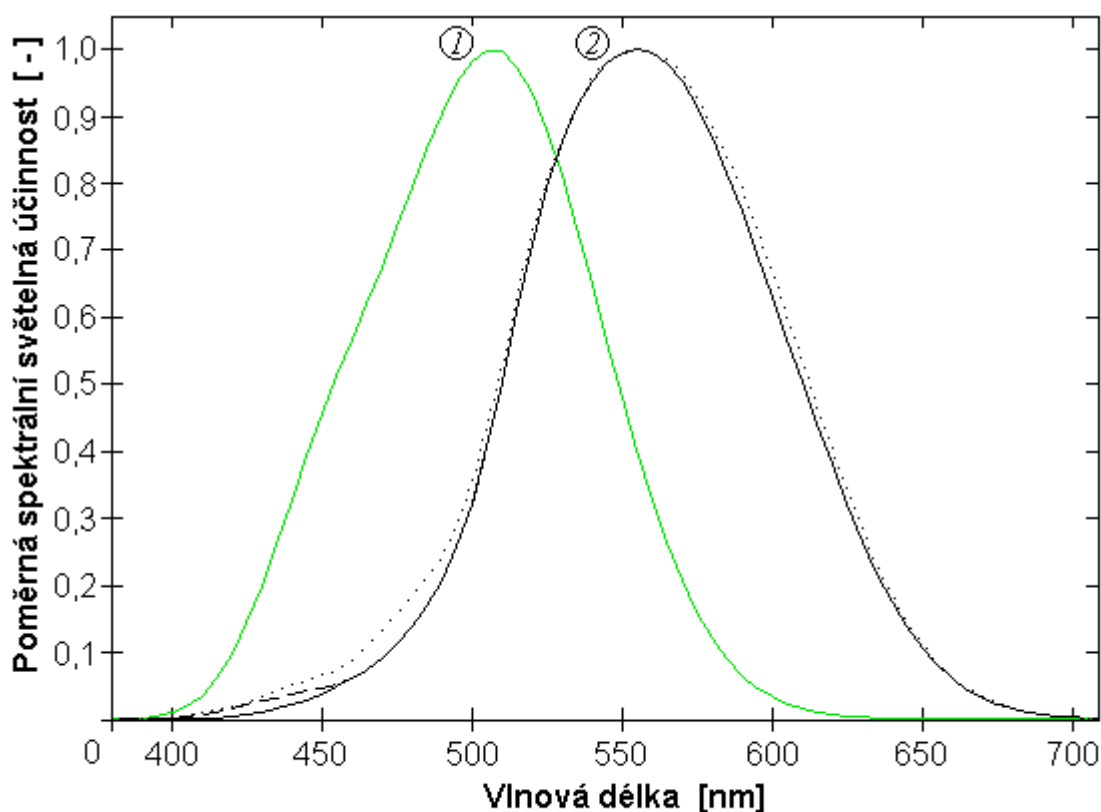
Před vlastním započítáním těchto měření však byla nutná návaznost na teorii radiometrických a fotometrických veličin, zvláště vztah mezi světelným a zářivým tokem (optickým výkonem). Výrobci LED diod uváděli v katalogových hodnotách pouze fotometrické veličiny svítivosti a vyzařovacího úhlu, které charakterizovali pouze světelný tok daných LED diod. Pro porovnání jednotlivých LED diod byl tedy nutný přepočítání světelného toku na zářivý tok, jehož velikost odpovídala světelnému výkonu dané LED diody.

13.1 POSTUP PŘEPOČTU SVĚTELNÉHO TOKU NA ZÁŘIVÝ TOK

Fotometrická veličina světelného toku Φ charakterizuje energii ΔE , kterou světelný zdroj vyzáří do prostoru v oboru viditelného záření za dobu $\Delta t = 1 \text{ s}$. [14]

Zatímco radiometrická veličina zářivého toku Φ_e charakterizuje také energii, kterou světelný zdroj vyzáří za jednotku času, ale v celém spektru elektromagnetických vln. [14]

Pro převod fotometrické energie na radiometrickou se využívá funkce světelné účinnosti záření na lidský zrak, která je součástí standartu CIE 1931 (Commission Internationale de l'Éclairage) a vyjadřuje citlivost lidského oka při denním (fotopickém vidění) a nočním vidění (skotopickém vidění). Tato funkce je zobrazena na obrázku 13.1. Z této funkce je zřejmé, že při vlnových délkách 507 nm (skotopické vidění) a 555 nm (fotopické vidění) má lidské oko největší citlivost.



1 - funkce světelné účinnosti pro skotopické vidění
 2 - funkce světelné účinnosti pro fotopické vidění

Obrázek 13.1: Funkce světelné účinnosti záření na lidský zrak dle CIE 1931 [13]

13.1.1 Charakteristika a popis veličin pro přepočet $\Phi(\lambda)$ na $\Phi_e(\lambda)$

Spektrální světelná účinnost záření $K(\lambda)$

Je to podíl světelného toku $\Phi(\lambda)$ a příslušného zářivého toku $\Phi_e(\lambda)$ při téže vlnové délce a vyjádří se pomocí vztahu:

$$K(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} \quad [lm \cdot W^{-1}, lm, W] \quad (13.1).$$

Největší spektrální světelná účinnost záření má při skotopickém (nočním) vidění hodnotu $K'_m = 1700 \text{ lm/W}$ pro monochromatické světelné záření o vlnové délce 507 nm. Při fotopickém (denním) vidění je $K_m = 683 \text{ lm/W}$ pro monochromatické světelné záření o vlnové délce 555 nm.

Poměrná spektrální světelná účinnost záření $V(\lambda)$

Je to poměr při určité vlnové délce spektrální světelné účinnosti záření $K(\lambda)$ a příslušné největší spektrální světelné účinnosti záření $K'_m = 1700 \text{ lm/W}$ nebo $K_m = 683 \text{ lm/W}$ a vyjádří se pomocí vztahů [14]:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad [-, \text{lm.W}^{-1}, \text{lm.W}^{-1}] \quad (13.2)$$

pro fotopické vidění nebo

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K'_m} \quad [-, \text{lm.W}^{-1}, \text{lm.W}^{-1}] \quad (13.3)$$

pro skotopické vidění.

Hodnotu poměrné spektrální světelné účinnosti lze také pro příslušnou vlnovou délku odečíst ze závislosti na obrázku 13.1.

13.1.2 Výpočet světelného toku Φ použitých LED diod

Výpočet světelného toku Φ se pro jednotlivé LED diody vyjádřil jako součin svítivosti I_V a prostorového úhlu Ω , do kterého LED dioda vyzařovala světelné záření, pomocí vztahu [14]:

$$\Phi = I_V \cdot 2\pi \cdot (1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \quad [\text{lm}, \text{cd}, ^\circ], \quad (13.4)$$

kde hodnotu prostorového úhlu Ω vyjadřuje část vztahu:

$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \quad [\text{sr}, ^\circ]. \quad (13.5)$$

Vypočtené hodnoty světelného toku Φ podle vztahu 13.4 jednotlivých LED diod jsou zobrazeny v tabulce 13.1. Příklad výpočtu světelného toku je uveden v kapitole 13.4.1 pro LED1.

Tabulka 13.1: Vypočtené hodnoty světelného toku (Φ) LED diod

Světelná dioda	LED1	LED2	LED3	LED4	LED5
Katalogové hodnoty	$\lambda = 470 \text{ nm}$ $I_V = 4,5 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$	$\lambda = 525 \text{ nm}$ $I_V = 13 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$	$\lambda = 590 \text{ nm}$ $I_V = 13 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$	$\lambda = 624 \text{ nm}$ $I_V = 13 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$	$\lambda = 635 \text{ nm}$ $I_V = 5 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$
$\Phi [\text{lm}]$	0,1075	0,3108	0,3108	0,3108	0,1195

13.1.3 Výpočet zářivého toku Φ_e použitých LED diod

Výpočet zářivého toku Φ_e jednotlivých použitých LED diod vycházel ze vztahů 13.1, 13.2 a 13.3 a vyjádřil se kombinací těchto vztahů:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{\Phi_e(\lambda)}{K_m} \Rightarrow \Phi_e(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{683} \cdot \frac{1}{V(\lambda)} \quad [W, lm, -] \quad (13.6)$$

pro fotopické vidění nebo

$$V'(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K'_m} = \frac{\Phi_e'(\lambda)}{K'_m} \Rightarrow \Phi_e'(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{1700} \cdot \frac{1}{V'(\lambda)} \quad [W, lm, -] \quad (13.7)$$

pro skotopické vidění.

Vypočtené hodnoty zářivého toku Φ_e podle vztahu 13.6 jednotlivých LED diod jsou zobrazeny v tabulce 13.2, včetně hodnot poměrné spektrální světelné účinnosti $V(\lambda)$, které byly odečteny ze závislosti na obrázku 13.2 (černá křivka funkce světelné účinnosti pro fotopické vidění) pro vlnové délky použitých LED diod. Příklad výpočtu zářivého toku je uveden v kapitole 13.4.1 pro LED1.

Tabulka 13.2: Vypočtené hodnoty zářivého toku (Φ_e) LED diod

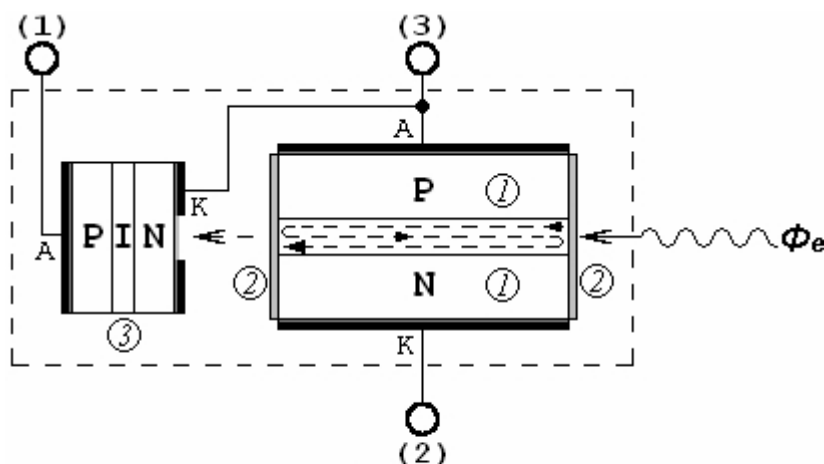
Světelná dioda	LED1	LED2	LED3	LED4	LED5
Katalogové hodnoty	$\lambda = 470 \text{ nm}$ $I_v = 4,5 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$	$\lambda = 525 \text{ nm}$ $I_v = 13 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$	$\lambda = 590 \text{ nm}$ $I_v = 13 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$	$\lambda = 624 \text{ nm}$ $I_v = 13 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$	$\lambda = 635 \text{ nm}$ $I_v = 5 \text{ cd}$ $\alpha = 10^\circ$
$V(\lambda) [-]$	0,09098	0,79320	0,75700	0,32100	0,21700
$\Phi_e [\text{mW}]$	1,72	0,57	0,6	1,42	0,81

13.2 POSTUP MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ DOPADAJÍCÍHO NA INTEGROVANOU FOTODIODU LASEROVÉ DIODY

13.2.1 Laserová dioda U-LD-650543A při dopadajícím světelném záření

Laserová dioda U-LD-650543A se řadí do skupiny hranově vyzařujících laserových diod a využívá Fabry - Perotův rezonátor s polopropustnými rovnoběžnými odraznými plochami k zesílení světelného záření (viz kapitola 3.3.2).

Toto měření se zabývá využitím rezonátoru k zesílení vnějšího světelného záření a možnou detekcí tohoto záření na integrované fotodiodě PIN. Obecně zjednodušená struktura laserové diody U-LD-650543A při dopadajícím světelném záření je zobrazena na obrázku 13.2.



- 1 - PN přechod laserové diody
- 2 - Polopropustná zrcadla (rezonátor)
- 3 - Monitorovací fotodioda PIN

Obrázek 13.2: Struktura laserové diody U-LD-650543A

Jak je vidět na tomto obrázku, tak dochází k opačnému postupu světelného záření než při jeho emitování. Dopadající světelné záření projde několikrát rezonátorem, tím dojde k jeho zesílení a část se ho promítne i na integrovanou fotodiodu PIN.

13.2.2 Postup měření

Proměřování vlivu dopadajícího vnějšího světelného záření na laserovou diodu U-LD-650543A s integrovanou fotodiodou PIN probíhalo podle následujícího postupu.

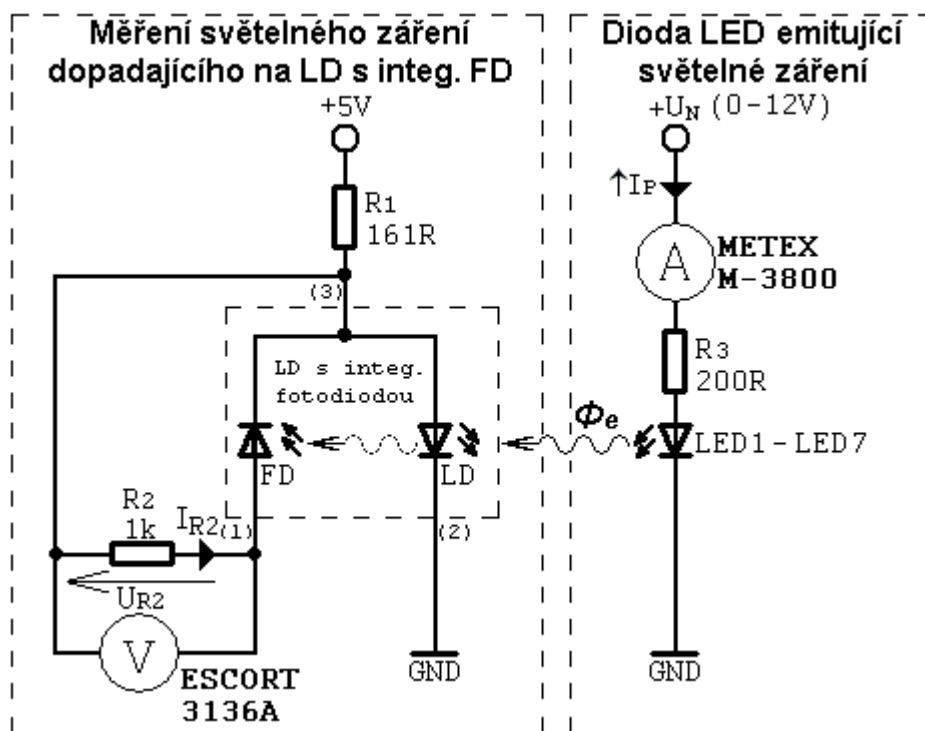
Laserová dioda a příslušná dioda LED byly zapojeny do nepájivého pole podle schématu na obrázku 13.3 a přes rezistory připojeny na obě větve napájecího zdroje Agilent - E3631A. Laserová dioda byla napájena konstantním napětím a byla buď v režimu zapnuto nebo vypnuto. U nastavované diody LED byl měněn pracovní proud I_P v závislosti na potřebách právě prováděného měření, což zajistilo změnu

světelného neboli zářivého toku diody. Pro přesnější nastavování pracovního proudu LED diodami byl v napájecí větvi použit multimetr METEX - 3800.

Vzdálenost mezi laserovou diodou a diodou LED se nastavila co nejmenší tak, aby se přenesl a navázal co možná největší optický výkon. Odzkoušením byla zvolena vzdálenost přibližně do 0,5 mm.

Postupně byly proměřeny všechny kombinace režimů s LED diodou (LD zapnuta - LED svítí na LD, LD vypnuta - LED svítí na LD) i bez LED diody pouze pro změření samotné laserové diody (LD zapnuta - LD svítí). Stejný postup měření byl postupně zopakován pro zbývající LED diody. Při každém měření se odečítala změna napětí U_{R2} na rezistoru R_2 fotodiody pomocí multimetru ESCORT - 3136A a následně se vypočítal proud I_{R2} rezistorem fotodiody pomocí vztahu:

$$I_{R2} = \frac{U_{R2}}{R_2} \quad [A, V, \Omega]. \quad (13.8)$$



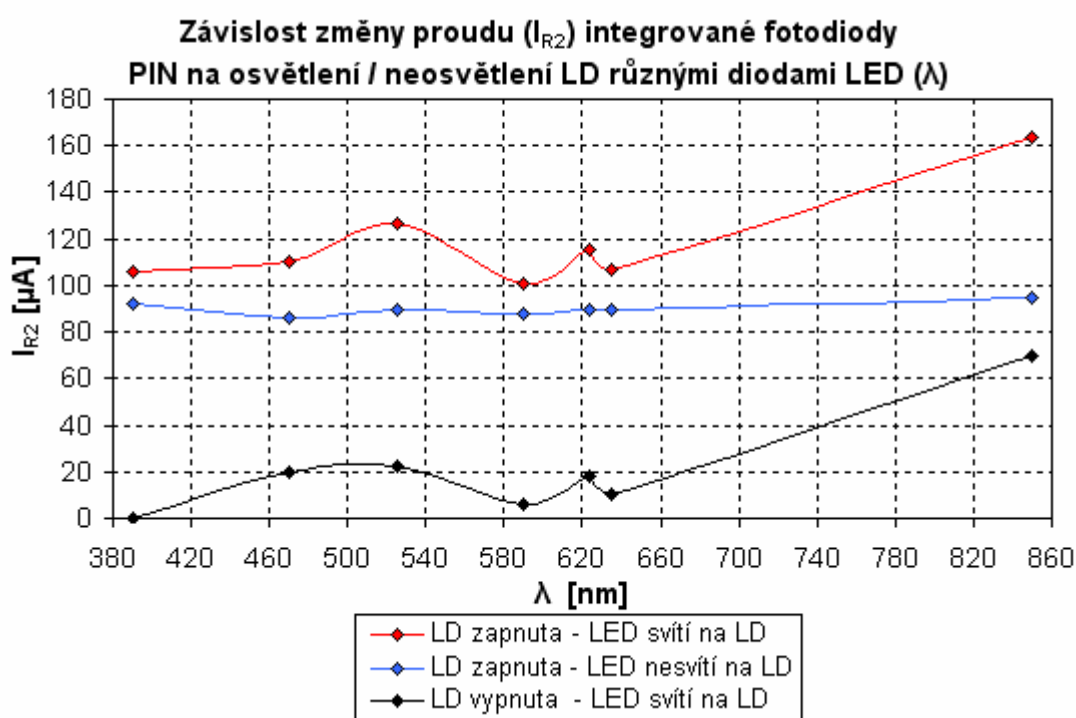
Obrázek 13.3: Schéma zapojení měření na integrované fotodiodě

13.3 MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ NA FOTODIODĚ

V této první části měření bylo cílem zjistit (změřit) zdali popsany princip v kapitole 13.2.1 je pravdivý. Měření probíhalo podle postupu popsaném v kapitole 13.2.2 a podle schéma zapojení na obrázku 13.3.

Při každé části měření byla nasměrovaná LED dioda nastavená na svou hodnotu katalogového pracovního napětí a proudu (viz tabulka 9.2), což způsobilo že emitovali světelné záření na laserovou diodu o zářivém toku, který byl vypočten v tabulce 13.2.

Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorem R_2 integrované fotodiody jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 13.



Obrázek 13.4: Závislosti $I_{R2} = f(\lambda)$ pro různé nastavené LED diody

13.3.1 Zhodnocení měření

Jak je vidět ze závislosti $I_{R2} = f(\lambda)$ na obrázku 13.4, tak byla ověřena možnost detekce dopadajícího světelného záření na integrované fotodiodě PIN laserové diody U-LD-650543A, jak při vypnuté, tak i zapnuté laserové diodě.

Nejpřesněji byla změřena charakteristika „LD vypnuta - LED svítí na LD”,

protože se zde neuplatnil vliv teplotní závislosti laserových diod. Velikost generovaného proudu I_{R2} fotodiodou s paralelně řazeným rezistorem R_2 závisí na hodnotě zářivého toku Φ_e (optického výkonu) nastavených LED diod a spektrální citlivosti integrované fotodiody.

Této sekundární funkce integrované fotodiody by šlo využít pro příjem datového optického signálu a zároveň pro vysílání optického signálu pomocí LD.

13.4 MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY FOTODIODY

V této druhé části měření bylo cílem zjistit (změřit) tvar spektrální charakteristiky integrované fotodiody laserové diody. Základní měření probíhalo podle postupu popsáném v kapitole 13.2.2 a podle schéma zapojení na obrázku 13.3.

Základní myšlenka měření spektrální charakteristiky spočívala v nastavení stejné předem zvolené hodnoty zářivého toku na všech LED diodách nastavením příslušné hodnoty pracovního proudu těmito LED diodami. Pracovní proud byl zjišťován jak pomocí výpočtu, tak i prostřednictvím spektrometru Ocean Optics USB 4000.

13.4.1 Zjištění hodnoty pracovního proudu pomocí výpočtu

Z vypočtených max. hodnot zářivého toku v tabulce 13.2 byla zvolena jednotná hodnota na $\Phi_e = 0,5 \text{ mW}$ pro všechny LED diody. Dále bylo potřeba dopočítat k této hodnotě příslušný pracovní proud každé LED diody pomocí kombinace vztahů 13.4 a 13.6.

- **Katalogové hodnoty diody LED1**

$$\lambda = 470 \text{ nm}, I_V = 4,5 \text{ cd}, \alpha = 10^\circ, I_P = 30 \text{ mA}, V(470) = 0,09098$$

- **Výpočet max. světelného toku**

$$\Phi = I_V \cdot 2\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) = 4500 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{10}{2}\right) = 0,1075 \text{ lm}$$

- **Výpočet max. zářivého toku**

$$\Phi_e = \frac{\Phi}{683 \cdot V(470)} = \frac{0,1075}{683} \cdot \frac{1}{0,09098} = 1,72 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 1,72 \text{ mW}$$

- **Výpočet světelného toku pro zvolené $\Phi_e = 0,5 \text{ mW}$**

$$\Phi_{(0,5)} = \Phi_{e(0,5)} \cdot 683 \cdot V(470) = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 683 \cdot 0,09098 = 0,03106 \text{ lm}$$

- **Výpočet svítivosti pro zvolené $\Phi_e = 0,5 \text{ mW}$**

$$I_{V(0,5)} = \frac{\Phi(0,5)}{2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos \frac{\alpha}{2})} = \frac{0,03106}{2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos \frac{10}{2})} = 1,299 \text{ cd}$$

- **Výpočet pracovního proudu pro zvolené $\Phi_e = 0,5 \text{ mW} \sim I_{V(0,5)} = 1,299 \text{ cd}$**

Při výpočtu pracovního proudu LED diod pro $\Phi_e = 0,5 \text{ mW}$ se vycházelo z charakteristiky závislosti svítivosti na pracovním proudu LED diodami, která je lineární.

$$I_{P(0,5)} = I_P \cdot \frac{I_{V(0,5)}}{I_V} = 0,030 \cdot \frac{1,299}{4,500} = 8,66 \cdot 10^{-3} = 8,66 \text{ mA}$$

Tento proud bylo potřeba nastavit na diodě LED1, aby vyzařovaný zářivý tok (světelný výkon) měl hodnotu 0,5 mW. Stejným postupem byly vypočteny i proudy pro zbylé LED diody, které byly postupně nasměrovány na laserovou diodu s integrovanou fotodiodou, na které byla měřena její spektrální charakteristika.

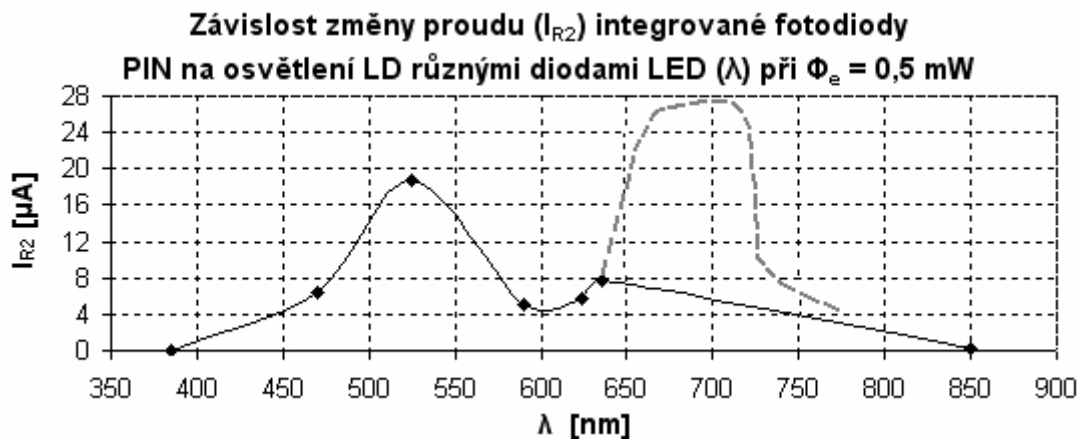
Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorem R_2 integrované fotodiody a příslušné nastavované hodnoty pracovního proudu jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 14.

13.4.2 Zjištění hodnoty pracovního proudu pomocí spektrometru

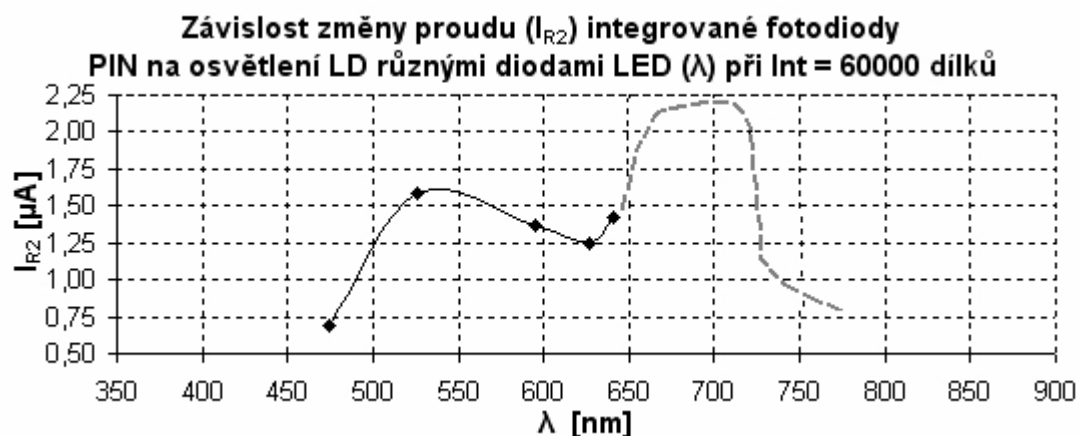
Určování pracovního proudu pomocí spektrometru spočívalo v nastavení (změření) stejné intenzity vyzařování jednotlivých LED diod na spektrometru. Tím byl zjištěn pracovní proud každé LED diody pro jednotnou měřenou hodnotu intenzity vyzařování ($\text{Int} = 60\,000 \text{ dílků}$). Odečtené hodnoty pracovních proudů byly postupně nastaveny na LED diodách, které byly postupně nasměrovány na laserovou diodu s integrovanou fotodiodou, na které byla měřena její spektrální charakteristika.

Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorem R_2 integrované fotodiody a příslušné nastavované hodnoty pracovního proudu jsou uvedeny v příloze 1 - tabulka 15.

13.4.3 Změřené spektrální charakteristiky integrované fotodiody



Obrázek 13.5: Spektrální charakteristika integ. fotodiody při $\Phi_e = 0,5 \text{ mW}$



Obrázek 13.6: Spektrální charakteristika integ. fotodiody $I_{nt} = 60\,000 \text{ dílků}$

13.4.4 Zhodnocení měření

Jak je vidět ze změřených spektrálních charakteristik integrované fotodiody PIN laserové diody U-LD-650543A na obrázcích 13.5 a 13.6, tak byly ověřeny oba postupy zjištění pracovního proudu LED diodami popsané v kapitolách 13.4.1 a 13.4.2. U obou dvou charakteristik však chybí hlavní část nad 650 nm, ve které by měla mít fotodioda největší citlivost pro příjem světelného záření emitovaného laserovou diodou v rozmezí vlnových délek 640 ~ 660 nm. Pro přesnější představu je přibližný tvar této chybějící části zobrazen čárkovaně.

14. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se a následně realizovat přenosové systémy využívající k přenosu více signálů jedno optické vlákno. Jednalo se především o systémy TDM a WDM pro obousměrný přenos napájecího a datového signálu

Z hlediska měřených parametrů v kapitole 12 se dá říci, že přenosový systém WDM má lepší vlastnosti než systém TDM. Jedná se především o útlum obou kanálů, který je u WDM pro oba stejně malý (viz tabulka 12.4). Zatímco u TDM záleželo na zvoleném vazebním poměru, který přímo určoval útlum těchto kanálů a zároveň udával, který kanál má větší prioritu (viz tabulka 12.2).

Dále se při posuzování obou systémů určovaly možné přeslechy do sousedních kanálů, což u WDM se nijak neprojevovalo (viz obrázek 12.6), zatímco u TDM především došlo k přeslechu z napájecího do datového kanálu, což by mohlo mít za následek chybu při přenosu dat (viz obrázek 12.4).

Oba přenosové systémy měly téměř totožnou hodnotu účinnosti přeneseného elektrického výkonu napájecího kanálu (TDM: 1,647 % a WDM: 1,412 %), což zřejmě bylo zapříčiněno použitím vysoce výkonové laserové diody, která částečně kompenzovala útlumy napájecích kanálů.

Z hlediska cenového pořízení těchto systémů by bylo lepší pro méně náročné aplikace zakoupit systém TDM, jehož optické a optoelektronické komponenty dohromady stály okolo 47150 Kč (viz tabulka 8.1). Pro levnější provedení systému TDM by bylo lepší zakoupit komponenty pracující na stejné vlnové délce a zároveň použít místo laserové diody SIEMENS SPL 2F81 (800 mW) napájecího kanálu variantu s nižším vyzařovacím výkonem, třeba do 200 mW, čímž by došlo k výraznému zlevnění systému.

Pro náročnější aplikace je možné zakoupit systém WDM, jehož optické a optoelektronické komponenty dohromady stály okolo 68100 Kč (viz tabulka 8.1). Opět je zde možnost použití levnější varianty výkonové laserové diody napájecího kanálu. Oba kanály však musí vysílat na příslušných vlnových délkách.

Oba systémy lze použít v elektromagneticky rušeném prostředí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky - 3.díl: Optoelektronika, optoelektronické prvky a optická vlákna*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 159 s. ISBN 80-7300-184-5.
- [2] P., S.. *Možnosti optických vláken* [online]. 2008 [cit. 2010-04-24]. Dostupný z WWW: <http://www.ofacom.cz/index.php?option=com_content&view=article&catid=80%3Aofs-v-&id=129%3Amoznosti-opticky-ch-vlak-en&Itemid=96>.
- [3] MICHAL, Lukáš. *Laserové diody - část 3* [online]. 2002 [cit. 2010-04-24]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35006>.
- [4] DVOŘÁČEK, Petr. *Spolehlivost laserových diod v pásmu 1500 nm* [online]. 2006 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z: <http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/tks/Spolehlivost_laserovych_diod_v_pasmu_1500_nm.pdf>.
- [5] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. 2006 [cit. 2010-04-24]. Dostupné z: <<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>.
- [6] HERMAN, Ivo. *Komunikační technologie*. Skriptum VUT Brno, 2006.
- [7] SÝKOROVÁ, J.. *Princip WDM* [online]. 2004 [cit. 2008-12-10]. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=princip-wdm&cislocclanku=2004072805>>.
- [8] PETERKA, Jiří. *Optická revoluce* [online]. 2000 [cit. 2008-12-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.earchiv.cz/b00/b1200005.php3>>.
- [9] RITA, Pužmanová. *WDM v optických metro a přístupových sítích* [online]. 2003 [cit. 2008-12-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/wdm-v-opticky-ch-metro-a-pristupovych-sitich/>>.
- [10] ROBINSON, Kevin Cyrus. *Polarization division multiplexing in optical data transmission systems*. 2003 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z: <<http://www.freepatentsonline.com/6301030.pdf>>

- [11] GOTTWALD, Jakub. *Parametry laserových diod a jejich měření* [online]. 2005 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z: <http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/tks/Parametry_diod.pdf?PHPSESSID=174625ecbea105cd2691281aeb3638da>.
- [12] BEJČEK, Ludvík - ŠEDIVÁ, Soňa. *Vláknová optika v automatizaci - návody do laboratorních cvičení*. Skriptum VUT Brno, 2004.
- [13] Luminosity function. Wikipedia - otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 2010-05-08]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Luminosity_function>.
- [14] GAJDOŠÍK, Libor. *Vybrané veličiny a jednotky soustavy SI* [online]. 2007 [cit. 2010-05-08]. Dostupné z: <<http://homen.vsb.cz/~gaj10/velic.pdf>>.
- [15] DATASHEET, U-LD-650543A [online]. [cit. 2010-05-08]. Dostupné z: <<http://www.uocnet.com/pdf/LD/U-LD-650543A..pdf>>.
- [16] DATASHEET, SIEMENS SPL 2F81 [online]. [cit. 2010-05-08]. Dostupné z: <http://www.ic-on-line.cn/IOL/viewpdf/Q62702-P1631_161549.htm>.
- [17] DATASHEET, LASER COMPONENTS PL13B002ST83-S-0 [online]. [cit. 2010-05-08]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/184150/MITSUBISHI/ML725B4_5F.html>.
- [18] Katalogový list TESLA 3WN166 20. In Katalog elektronických součástek, konstrukčních dílů, bloků a přístrojů. 5. díl. TESLA Eltos, 1989.
- [19] DATASHEET, LASER COMPONENTS PDINP075ST83-Z-0 [online]. [cit. 2010-05-08]. Dostupné z: <http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/pd_ld/pdinp-series.pdf>.
- [20] DATASHEET, THORLABS FCMM625-90A-FC [online]. [cit. 2010-05-08]. Dostupné z: <<http://www.thorlabs.com/catalogPages/v20/926.pdf>>.
- [21] DATASHEET, LASER COMPONENTS MX.062.0813.32-1 [online]. [cit. 2010-05-08]. Dostupné z: <http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/ati/mm_wdm.pdf>.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka / Symbol	Jednotka	Popis
U_N	V	napájecí napětí
U_R	V	napětí na rezistoru
I_R	A	proud rezistorem
R	Ω	rezistor
P_1	W	elektrický příkon
P_2	W	elektrický výkon
η_e	%	účinnost přeneseného el. výkonu
A	V	amplituda
U_{DC}	V	stejnoseměrné napětí
f	Hz	frekvence
λ	nm	vlnová délka optického záření
η	W / A	diferenciální účinnost laserové diody
I_{TH}	A	prahový proud
I_P	A	pracovní proud laserové diody
S	A / W	citlivost fotodiody
$K(\lambda)$	lm / W	spektrální světelná účinnost záření
$V(\lambda)$	-	poměrná spektrální světelná účinnost záření
Φ	lm	světelný tok
Φ_e	W	zářivý tok
P_O	W	optický výkon světelného záření
LD	-	laserová dioda
FD	-	fotodioda
K1	-	kanál 1
K2	-	kanál 2
sluč. / rozboč.	-	optický slučovač / rozbočovač
MUX / DMUX	-	optický multiplexer / demultiplexer

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - naměřené a vypočtené hodnoty (tabulky).

Příloha 2 - naměřené charakteristiky (grafy).

Příloha 1

Tabulka 1: Naměřené a vypočtené hodnoty optického výkonu ($P_{O(20dB)}$ a P_O) světelného záření laserové diody SIEMENS SPL 2F81

I_P [mA]	0	100	200	300	400	420	440	460	480
U_N [V]	0	1,853	2,225	2,591	2,948	3,018	3,087	3,157	3,229
$P_{O(20dB)}$ [μW]	0	0,141	0,471	1,210	2,920	3,430	4,090	4,940	6,080
P_O [mW]	0	0,014	0,047	0,121	0,292	0,343	0,409	0,494	0,608
I_P [mA]	500	520	540	560	600	700	800	900	1000
U_N [V]	3,303	3,371	3,441	3,510	3,651	4,004	4,349	834,000	5,045
$P_{O(20dB)}$ [μW]	7,660	27,600	42,100	73,900	148,000	386,000	599,000	8340,00	1110,000
P_O [mW]	0,766	2,760	4,210	7,390	14,800	38,600	59,900	83,400	111,000

Příklad výpočtu pro $I_P = 500 \text{ mA}$: $P_O = P_{O(20dB)} \cdot 100 = 7,660 \cdot 100 = 766 \text{ μW} = 0,766 \text{ mW}$.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty optického výkonu (P_O) světelného záření laserové diody LASER COMPONENTS PL13B002ST83-S-0

I_P [mA]	0	2,00	4,00	5,00	5,25	5,50	5,80	6,00	6,25
U_N [V]	0	1,250	1,593	1,761	1,802	1,844	1,893	1,926	1,967
P_O [μW]	0	1,48	3,84	6,20	7,62	8,58	11,80	20,67	79,76
I_P [mA]	6,50	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,74
U_N [V]	2,007	2,087	2,248	2,409	2,569	2,729	2,889	3,049	3,329
P_O [μW]	130,80	240,2	470,80	695,90	925,80	1158,00	1395,00	1632,00	2000,00

Tabulka 3: Naměřené a vypočtené hodnoty optického výkonu ($P_{O(20dB)}$ a $P_{O(10dB)}$) světelného záření dopadajícího na fotodiodu TESLA 3 WN 166 20

I_P [mA]	0	100	200	300	400	450	500	525	550
U_N [V]	0	1,856	2,229	2,590	2,946	3,126	3,300	3,388	3,476
$P_{O(20 \text{ dB})}$ [μW]	0	0,16	0,56	1,44	3,48	5,62	18,60	36,60	83,70
$P_{O(10 \text{ dB})}$ [mW]	0	0,002	0,006	0,014	0,035	0,056	0,186	0,366	0,837
I_P [mA]	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
U_N [V]	3,652	3,829	4,005	4,179	4,357	4,532	4,707	4,883	5,050
$P_{O(20 \text{ dB})}$ [μW]	192,00	335,00	458,00	579,00	698,00	816,00	905,00	1070,00	1260,00
$P_{O(10 \text{ dB})}$ [mW]	1,920	3,350	4,580	5,790	6,980	8,160	9,050	10,700	12,600

Příklad výpočtu pro $I_P = 600 \text{ mA}$: $P_O = P_{O(20dB)} \cdot 10 = 192 \cdot 10 = 1920 \text{ μW} = 1,92 \text{ mW}$.

Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí (U_{R2}) a proudů (I_{R2}) na rezistorech R_2 (100 Ω) fotodiod TESLA 3 WN 166 20 pro $P_{O(10\text{ db})}$

Fotodioda	I_P [mA]	0	100	200	300	400	450	500	525	550
FD1	U_N [V]	0	1,852	2,222	2,583	2,938	3,115	3,293	3,378	3,466
	U_{R2} [mV]	0	0,06	0,22	0,57	1,39	2,22	7,76	14,36	31,33
	I_{R2} [mA]	0	0,001	0,002	0,006	0,014	0,022	0,078	0,144	0,313
FD2	U_N [V]	0	1,846	2,221	2,581	2,939	3,117	3,293	3,379	3,466
	U_{R2} [mV]	0	0,07	0,24	0,62	1,48	2,34	3,86	11,89	21,69
	I_{R2} [mA]	0	0,001	0,002	0,006	0,015	0,023	0,039	0,119	0,217
FD3	U_N [V]	0	1,853	2,225	2,587	2,942	3,119	3,294	3,382	3,469
	U_{R2} [mV]	0	0,07	0,03	0,66	1,61	2,60	9,87	18,18	33,87
	I_{R2} [mA]	0	0,001	0,000	0,007	0,016	0,026	0,099	0,182	0,339
FD4	U_N [V]	0	1,846	2,219	2,581	2,937	3,119	3,296	3,382	3,470
	U_{R2} [mV]	0	0,07	0,25	0,63	1,51	2,38	4,63	12,48	23,37
	I_{R2} [mA]	0	0,001	0,003	0,006	0,015	0,024	0,046	0,125	0,234
FD5	U_N [V]	0	1,855	2,237	2,607	2,972	3,152	3,333	3,422	3,512
	U_{R2} [mV]	0	0,07	0,25	0,64	1,53	2,41	4,50	11,38	22,78
	I_{R2} [mA]	0	0,001	0,003	0,006	0,015	0,024	0,045	0,114	0,228
Fotodioda	I_P [mA]	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
FD1	U_N [V]	3,642	3,817	3,992	4,166	4,339	4,514	4,690	4,866	5,041
	U_{R2} [mV]	72,15	121,68	174,62	215,45	263,27	303,22	339,15	394,81	459,27
	I_{R2} [mA]	0,722	1,217	1,746	2,155	2,633	3,032	3,392	3,948	4,593
FD2	U_N [V]	3,642	3,816	3,993	4,173	4,347	4,520	4,690	4,865	5,043
	U_{R2} [mV]	65,63	119,37	171,43	223,43	284,45	342,67	381,16	428,71	488,57
	I_{R2} [mA]	0,656	1,194	1,714	2,234	2,845	3,427	3,812	4,287	4,886
FD3	U_N [V]	3,644	3,819	3,993	4,168	4,346	4,521	4,694	4,863	5,038
	U_{R2} [mV]	81,46	139,61	191,45	235,73	281,23	337,78	384,48	430,62	488,36
	I_{R2} [mA]	0,815	1,396	1,915	2,357	2,812	3,378	3,845	4,306	4,884
FD4	U_N [V]	3,647	3,819	3,994	4,169	4,345	4,520	4,695	4,871	5,046
	U_{R2} [mV]	72,82	127,45	179,42	231,16	282,57	335,75	390,45	458,78	492,72
	I_{R2} [mA]	0,728	1,275	1,794	2,312	2,826	3,358	3,905	4,588	4,927
FD5	U_N [V]	3,691	3,869	4,047	4,226	4,406	4,583	4,760	4,934	5,107
	U_{R2} [mV]	74,21	128,19	182,25	234,68	287,24	345,13	389,65	435,59	498,37
	I_{R2} [mA]	0,742	1,282	1,823	2,347	2,872	3,451	3,897	4,356	4,984

Příklad výpočtu pro FD4, $I_P = 600\text{ mA}$: $I_{R2} = \frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{72,82}{100} = 0,7282\text{ mA}$.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty optického výkonu (P_O) světelného záření dopadajícího na fotodiodu PDINP075ST83-W-0

I_P [mA]	0	2,00	4,00	5,00	5,25	5,50	5,80	6,00	6,25
U_N [V]	0	1,250	1,593	1,761	1,802	1,844	1,893	1,926	1,967
P_O [μW]	0	1,48	3,84	6,20	7,62	8,58	11,80	20,67	79,76
I_P [mA]	6,50	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,74
U_N [V]	2,007	2,087	2,248	2,409	2,569	2,729	2,889	3,049	3,329
P_O [μW]	130,80	240,2	470,80	695,90	925,80	1158,00	1395,00	1632,00	2000,00

Tabulka 6: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí (U_{R2}) a proudů (I_{R2}) na rezistoru R_2 (1 kΩ) fotodiody PDINP075ST83-W-0 pro P_O

I_P [mA]	0	2,00	4,00	5,00	5,25	5,50	5,80	6,00	6,25
U_N [V]	0	1,250	1,593	1,761	1,802	1,844	1,893	1,926	1,967
U_{R2} [mV]	0	1,24	3,21	5,43	6,45	7,91	11,83	24,79	78,45
I_{R2} [μA]	0	1,24	3,21	5,43	6,45	7,91	11,83	24,79	78,45
I_P [mA]	6,50	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,74
U_N [V]	2,007	2,087	2,248	2,409	2,569	2,729	2,889	3,049	3,329
U_{R2} [mV]	126,34	215,76	392,51	465,23	490,11	503,86	513,28	520,86	528,65
I_{R2} [μA]	126,34	215,76	392,51	465,23	490,11	503,86	513,28	520,86	528,65

Tabulka 7: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorama R_2 a R_4 (100 Ω) fotodiod jednotlivých kanálů TDM pro první krok měření

I_{P1} [mA]	0	100	200	300	400	420	440	460	480
U_{N1} [V]	0	1,847	2,217	2,577	2,935	3,001	3,072	3,155	3,221
Proměřovaný napájecí kanál LD SIEMENS SPL 2F81 → FD4 TESLA 3 WN 166 20.									
U_{R2} [mV]	0	0,300	1,040	2,680	6,320	7,160	8,220	10,120	12,140
I_{R2} [mA]	0	0,003	0,010	0,027	0,063	0,072	0,082	0,101	0,121
Přeslech napájecího kanálu na fotodiodu PDINP075ST83-W-0 datového kanálu.									
U_{R4} [mV]	0	0,000	0,000	0,010	0,020	0,020	0,030	0,040	0,050
I_{R4} [μA]	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,300	0,400	0,500
I_{P1} [mA]	500	520	540	560	580	600	620	640	700
U_{N1} [V]	3,290	3,353	3,419	3,489	3,561	3,630	3,699	3,769	3,976,
Proměřovaný napájecí kanál LD SIEMENS SPL 2F81 → FD4 TESLA 3 WN 166 20.									
U_{R2} [mV]	14,480	17,580	40,710	108,640	168,590	253,780	330,640	416,110	583,410
I_{R2} [mA]	0,145	0,176	0,407	1,086	1,686	2,538	3,306	4,161	5,834
Přeslech napájecího kanálu na fotodiodu PDINP075ST83-W-0 datového kanálu.									
U_{R4} [mV]	0,060	0,070	0,120	0,300	0,420	0,710	1,030	1,420	2,710
I_{R4} [μA]	0,600	0,700	1,200	3,000	4,200	7,100	10,300	14,200	27,100

Tabulka 8: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorama R_2 a R_4 ($100\ \Omega$) fotodiod jednotlivých kanálů TDM pro druhý krok měření

I_{P3} [mA]	0	2,00	4,00	5,00	5,25	5,50	5,80	6,00	6,25
U_{N3} [V]	0	1,280	1,630	1,810	1,850	1,890	1,950	1,980	2,020
Proměřovaný datový kanál LD PL13B002ST83-S-0 → FD PDINP075ST83-W-0.									
U_{R4} [mV]	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
I_{R4} [μA]	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Přeslech datového kanálu na fotodiodu TESLA 3 WN 166 20 napájecího kanálu.									
U_{R2} [mV]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I_{R2} [μA]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I_{P3} [mA]	6,50	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,74
U_{N3} [V]	2,060	2,150	2,310	2,470	2,660	2,820	2,980	3,160	3,450
Proměřovaný datový kanál LD PL13B002ST83-S-0 → FD PDINP075ST83 - W - 0.									
U_{R4} [mV]	0,010	0,030	0,050	0,070	0,100	0,130	0,160	0,190	0,210
I_{R4} [μA]	0,100	0,300	0,500	0,700	1,000	1,300	1,600	1,900	2,100
Přeslech datového kanálu na fotodiodu TESLA 3 WN 166 20 napájecího kanálu.									
U_{R2} [mV]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I_{R2} [μA]	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabulka 9: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorama R_2 a R_4 ($100\ \Omega$) fotodiod jednotlivých kanálů TDM pro třetí krok měření

I_{P1} [mA]	0	100	200	300	400	420	440	460	480
U_{N1} [V]	0	1,844	2,214	2,573	2,930	3,000	3,068	3,139	3,207
Proměřovaný napájecí kanál LD SIEMENS SPL 2F81 → FD4 TESLA 3 WN 166 20.									
U_{R2} [mV]	0	0,300	1,040	2,660	6,380	7,450	8,820	10,220	11,220
I_{R2} [mA]	0	0,003	0,010	0,027	0,064	0,075	0,088	0,102	0,112
P_1 [mW]	0	151,40	310,80	474,90	644,00	677,88	711,04	745,66	779,04
P_2 [mW]	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
Proměřovaný datový kanál LD PL13B002ST83-S-0 → FD PDINP075ST83-W-0 při $I_{P3} = 14,74\ \text{mA} \sim P_O = 2\ \text{mW}$									
U_{R4} [mV]	0,220	0,220	0,220	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230
I_{R4} [μA]	2,200	2,200	2,200	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300
I_{P1} [mA]	500	520	540	560	580	600	620	640	700
U_{N1} [V]	3,287	3,347	3,417	3,486	3,556	3,626	3,696	3,766	3,975
Proměřovaný napájecí kanál LD SIEMENS SPL 2F81 → FD4 TESLA 3 WN 166 20.									
U_{R2} [mV]	13,690	16,150	25,780	61,830	134,170	215,580	319,360	466,420	582,700
I_{R2} [mA]	0,137	0,162	0,258	0,618	1,342	2,156	3,194	4,664	5,827
P_1 [mW]	818,50	848,12	882,90	917,28	952,36	987,60	1023,00	1058,56	1165,50
P_2 [mW]	0,002	0,003	0,007	0,038	0,180	0,465	1,020	2,175	3,395
Proměřovaný datový kanál LD PL13B002ST83-S-0 → FD PDINP075ST83-W-0 při $I_{P3} = 14,74\ \text{mA} \sim P_O = 2\ \text{mW}$									
U_{R4} [mV]	0,230	0,230	0,240	0,250	0,260	0,270	0,280	0,290	0,310
I_{R4} [μA]	2,300	2,300	2,400	2,500	2,600	2,700	2,800	2,900	3,100

Tabulka 12: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorama R_2 a R_4 ($100\ \Omega$) fotodiod jednotlivých kanálů WDM pro třetí krok měření

I_{P1} [mA]	0	100	200	300	400	420	440	460	480
U_{N1} [V]	0	1,834	2,205	2,569	2,920	2,990	3,062	3,132	3,272
Proměřovaný napájecí kanál LD SIEMENS SPL 2F81 → FD4 TESLA 3 WN 166 20.									
U_{R2} [mV]	0	0,180	0,630	1,620	3,740	4,370	5,190	6,150	8,920
I_{R2} [mA]	0	0,002	0,006	0,016	0,037	0,044	0,052	0,062	0,089
P_1 [mW]	0	150,40	309,00	473,70	640,00	673,68	708,40	742,44	810,24
P_2 [mW]	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Proměřovaný datový kanál LD PL13B002ST83-S-0 → FD PDINP075ST83-W-0 při $I_{P3} = 14,74\text{ mA} \sim P_O = 2\text{ mW}$									
U_{R4} [mV]	86,200	86,400	86,600	86,800	87,700	87,800	88,100	87,400	87,900
I_{R4} [mA]	0,862	0,864	0,866	0,868	0,877	0,878	0,881	0,874	0,879
I_{P1} [mA]	500	520	540	560	580	600	620	640	700
U_{N1} [V]	3,271	3,341	3,411	3,481	3,550	3,620	3,690	3,760	3,969
Proměřovaný napájecí kanál LD SIEMENS SPL 2F81 → FD4 TESLA 3 WN 166 20.									
U_{R2} [mV]	8,440	10,780	12,930	46,980	101,630	181,820	244,630	321,800	532,500
I_{R2} [mA]	0,084	0,108	0,129	0,470	1,016	1,818	2,446	3,218	5,325
P_1 [mW]	810,50	845,00	879,66	914,48	948,88	984,00	1019,28	1054,72	1161,30
P_2 [mW]	0,001	0,001	0,002	0,022	0,103	0,331	0,598	1,036	2,836
Proměřovaný datový kanál LD PL13B002ST83-S-0 → FD PDINP075ST83-W-0 při $I_{P3} = 14,74\text{ mA} \sim P_O = 2\text{ mW}$									
U_{R4} [mV]	86,400	86,700	87,100	87,900	87,400	87,100	87,150	87,400	86,500
I_{R4} [mA]	0,864	0,867	0,871	0,879	0,874	0,871	0,872	0,874	0,865

Tabulka 13: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorem R_2 ($1\text{ k}\Omega$) integrované fotodiody v laserové diodě LD U-LD-650543A pro různé Φ_e

Nastavované LED	LED svítí na LD				LED nesvítí na LD	
	LD zapnuta		LD vypnuta		LD zapnuta	
	U_{R2} [mV]	I_{R2} [μ A]	U_{R2} [mV]	I_{R2} [μ A]	U_{R2} [mV]	I_{R2} [μ A]
LED1 (470 nm) $U_N = 9,53\text{ V}$, $I_P = 30\text{ mA}$	109,83	109,83	19,95	19,95	85,76	85,76
LED2 (525 nm) $U_N = 7,45\text{ V}$, $I_P = 20\text{ mA}$	126,27	126,27	22,73	22,73	89,78	89,78
LED3 (590 nm) $U_N = 6,20\text{ V}$, $I_P = 20\text{ mA}$	100,72	100,72	6,27	6,27	87,81	87,81
LED4 (624 nm) $U_N = 6,48\text{ V}$, $I_P = 20\text{ mA}$	115,31	115,31	18,28	18,28	89,44	89,44
LED5 (635 nm) $U_N = 6,08\text{ V}$, $I_P = 20\text{ mA}$	106,37	106,37	10,17	10,17	89,83	89,83
LED6 (390 nm) - UV $U_N = 8,33\text{ V}$, $I_P = 20\text{ mA}$	163,46	163,46	69,73	69,73	94,52	94,52
LED7 (850 nm) - IR $U_N = 11,51\text{ V}$, $I_P = 50\text{ mA}$	163,46	163,46	69,73	69,73	94,52	94,52

Tabulka 14: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorem R_2 (1 k Ω) integrované fotodiody PIN při $\Phi_e = 0,5$ mW

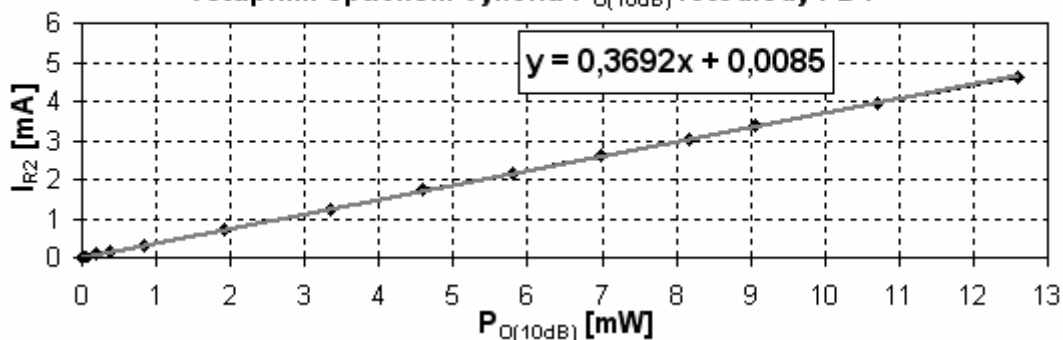
Nastavované LED	LED svítí na LD				LED nesvítí na LD	
	LD zapnuta		LD vypnuta		LD zapnuta	
	U_{R2} [mV]	I_{R2} [μ A]	U_{R2} [mV]	I_{R2} [μ A]	U_{R2} [mV]	I_{R2} [μ A]
LED1 (470 nm) $U_N = 4,69$ V, $I_P = 8,66$ mA	95,20	95,20	6,50	6,50	78,30	78,30
LED2 (525 nm) $U_N = 6,89$ V, $I_P = 17,41$ mA	104,70	104,70	18,70	18,70	80,10	80,10
LED3 (590 nm) $U_N = 5,48$ V, $I_P = 16,63$ mA	91,50	91,50	5,10	5,10	76,60	76,60
LED4 (624 nm) $U_N = 3,63$ V, $I_P = 7,05$ mA	94,80	94,80	5,80	5,80	81,70	81,70
LED5 (635 nm) $U_N = 4,47$ V, $I_P = 12,39$ mA	94,80	94,80	7,80	7,80	78,10	78,10
LED6 (390 nm) - UV $U_N = 4,72$ V, $I_P = 5,00$ mA	102,60	102,60	0,10	0,10	80,40	80,40
LED7 (850 nm) - IR $U_N = 1,21$ V, $I_P = 0,20$ mA	83,90	83,90	0,20	0,20	81,30	81,30

Tabulka 15: Naměřené a vypočtené hodnoty napětí a proudů rezistorem R_2 (1 k Ω) integrované fotodiody PIN při $Int = 60000$ dílků

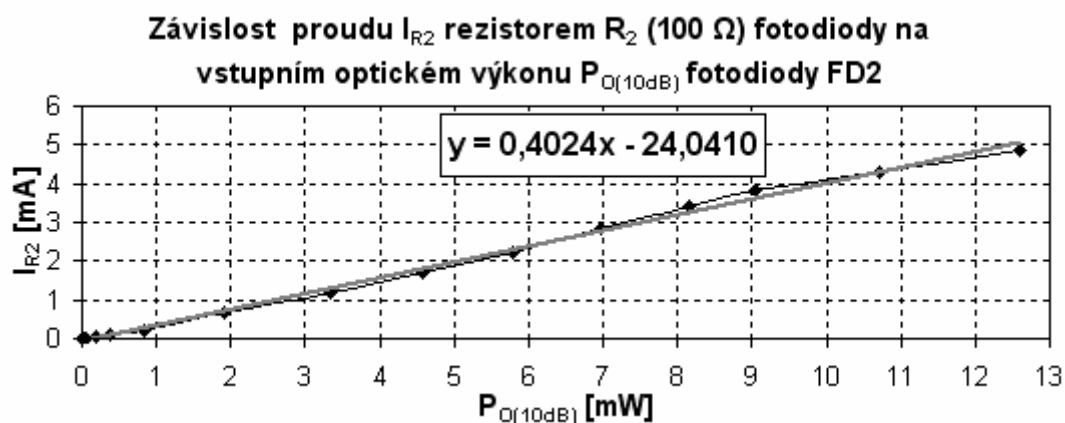
Použité LED	Měření LED na spektrometru pro zjištění I_P při $Int = 60000$ dílků				LED svítí na LD	
	Int [dílký]	λ_M [nm]	U_N [V]	I_P [mA]	LD nesvítí	
					U_{R2} [mV]	I_{R2} [μ A]
LED1 (470 nm)	60000	474,1	2,81	0,841	0,69	0,69
LED2 (525 nm)		525,5	3,31	1,441	1,58	1,58
LED3 (590 nm)		594,7	2,75	2,875	1,37	1,37
LED4 (624 nm)		627,1	2,42	1,188	1,24	1,24
LED5 (635 nm)		641,1	2,34	1,891	1,42	1,42
LED7 (850 nm) - IR		843,1	3,26	9,498	17,42	17,42

Příloha 2

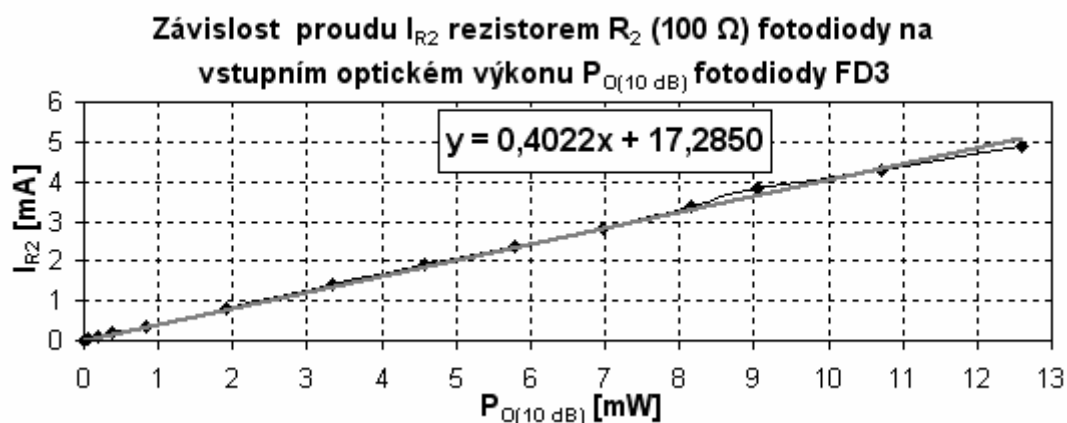
Závislost proudu (I_{R2}) rezistorem R_2 (100 Ω) fotodiody na vstupním optickém výkonu $P_{O(10dB)}$ fotodiody FD1



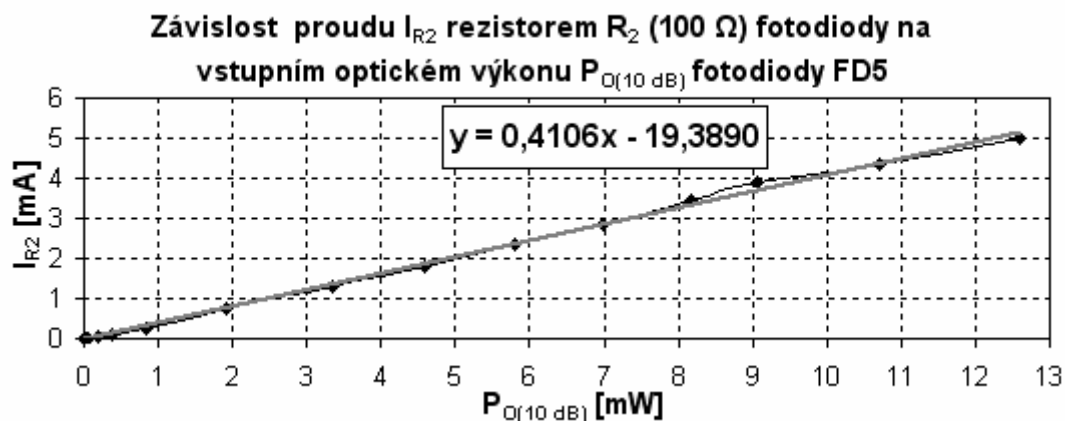
Obrázek 1: Závislost $I_{R2} = f(P_{O(10dB)})$ pro FD1 TESLA 3 WN 166 20



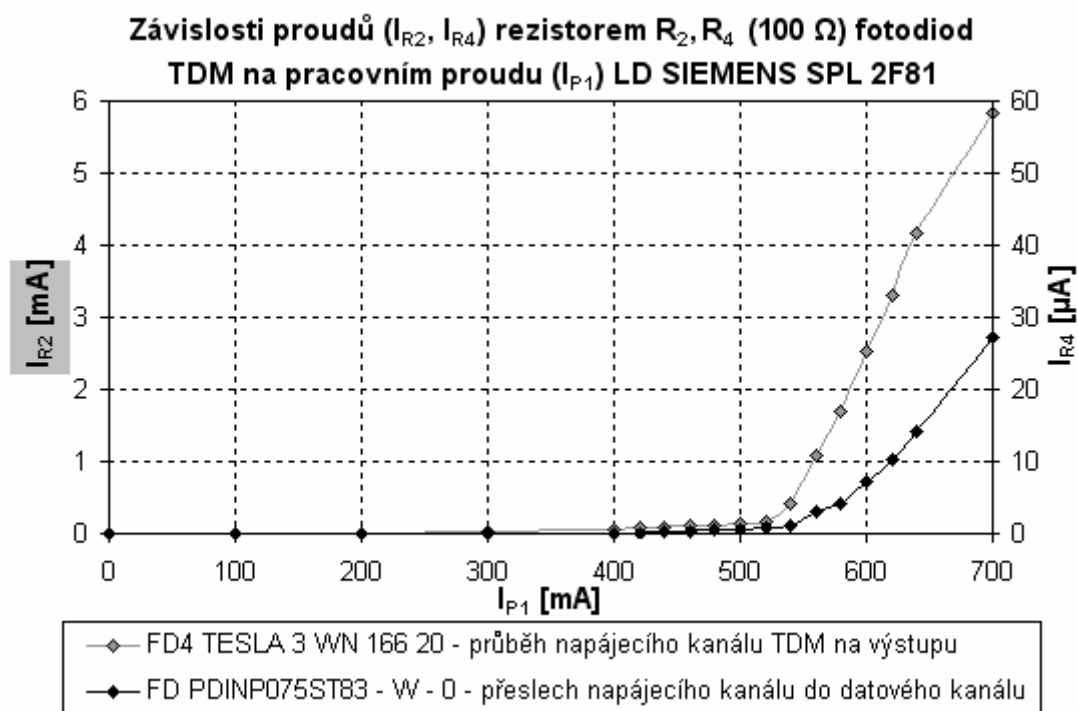
Obrázek 2: Závislost $I_{R2} = f(P_{O(10dB)})$ pro FD2 TESLA 3 WN 166 20



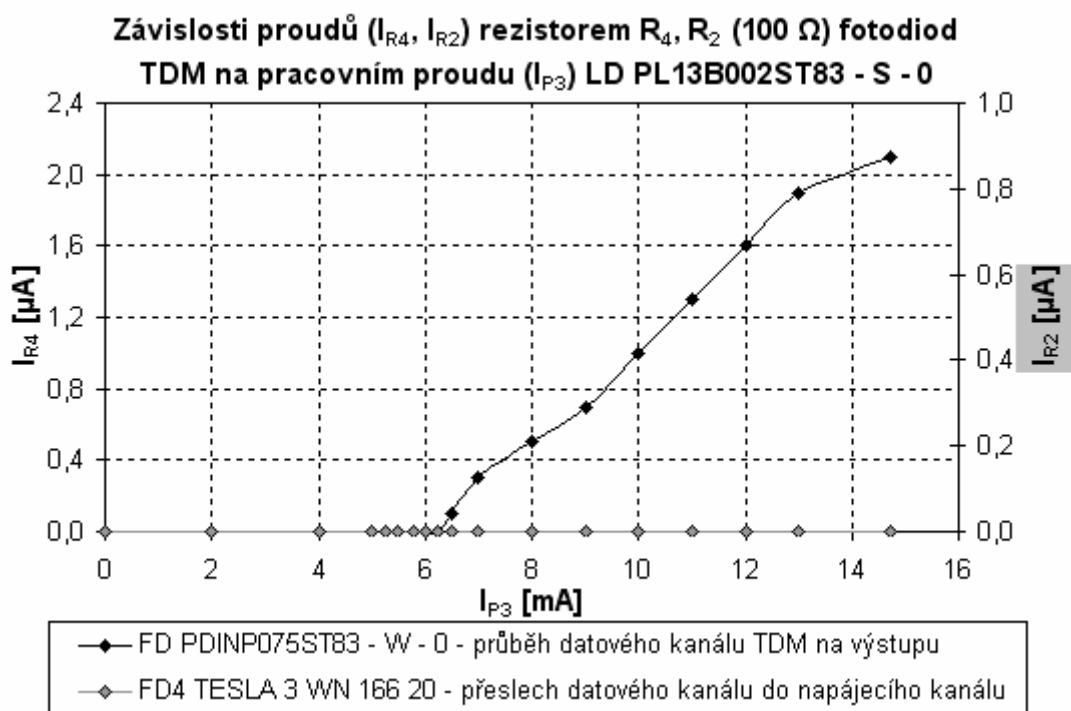
Obrázek 3: Závislost $I_{R2} = f(P_{O(10dB)})$ pro FD3 TESLA 3 WN 166 20



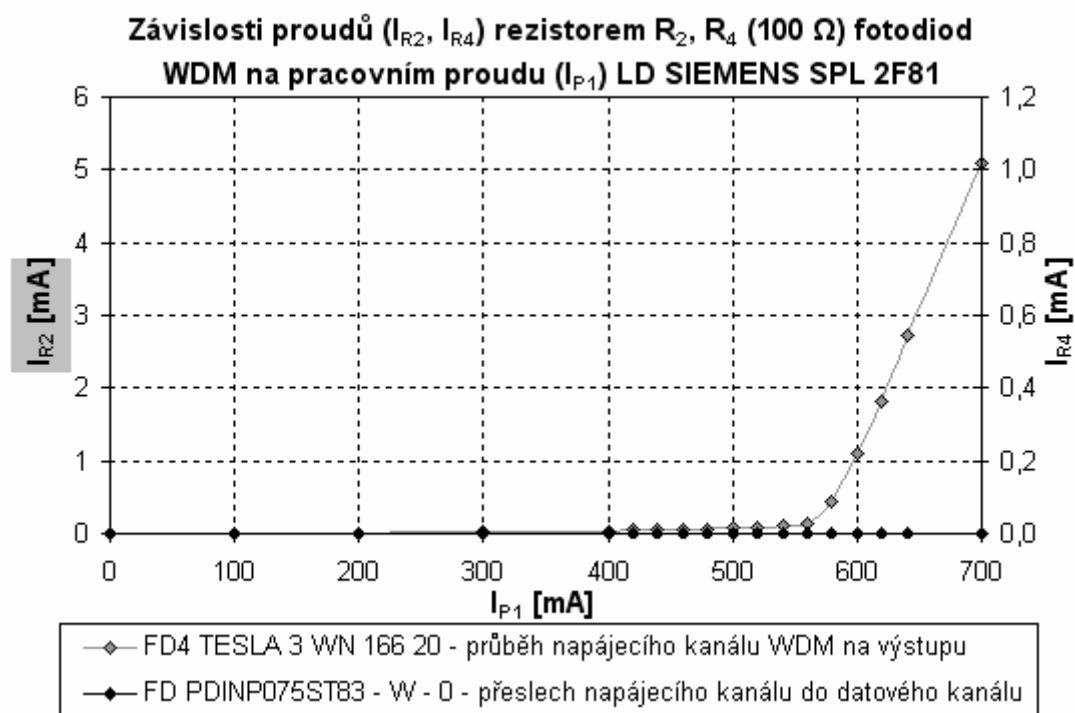
Obrázek 4: Závislost $I_{R2} = f(P_{O(10dB)})$ pro FD5 TESLA 3 WN 166 20



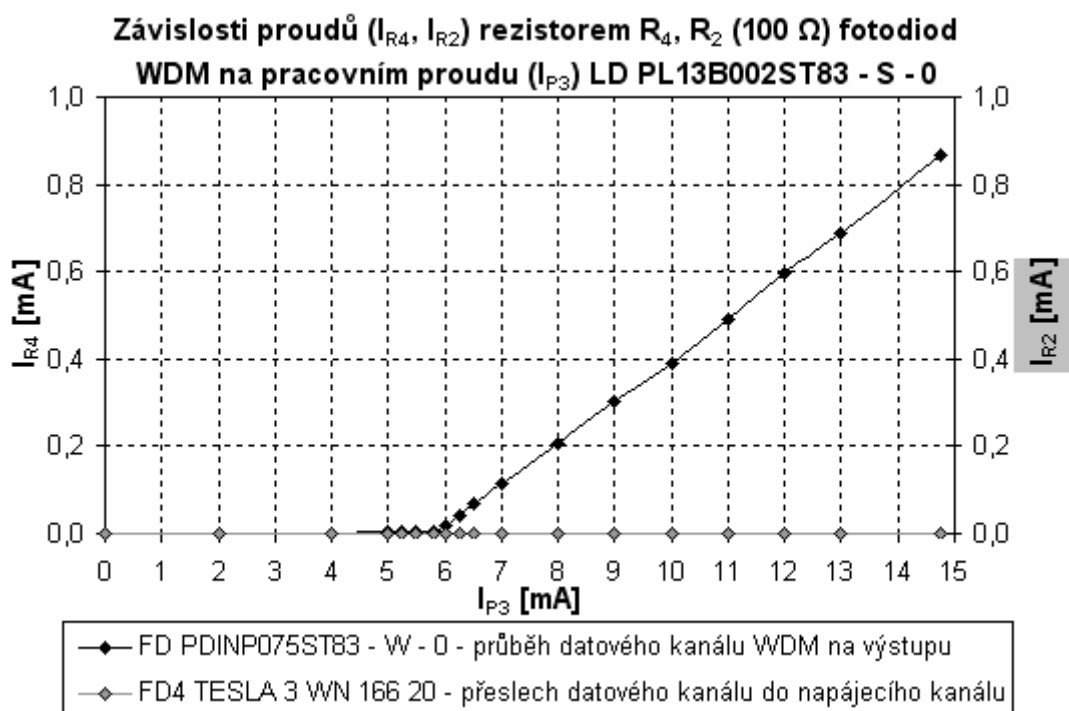
Obrázek 5: Závislost I_{R2} , $I_{R4} = f(I_{P1})$ pro první krok měření TDM



Obrázek 6: Závislost I_{R4} , $I_{R2} = f(I_{P3})$ pro druhý krok měření TDM



Obrázek 7: Závislost I_{R2} , $I_{R4} = f(I_{P1})$ pro první krok měření WDM



Obrázek 8: Závislost I_{R4} , $I_{R2} = f(I_{P3})$ pro druhý krok měření WDM